



MELISSA APARECIDA LOPES

**SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA PARA A PRODUÇÃO DE
CAFÉ SOLÚVEL: CINÉTICA DE SECAGEM, QUALIDADE
DO PRODUTO, CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA E
EMISSIONES DE CO₂**

LAVRAS-MG

2023

MELISSA APARECIDA LOPES

**SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA PARA A PRODUÇÃO DE CAFÉ SOLÚVEL:
CINÉTICA DE SECAGEM, QUALIDADE DO PRODUTO, CONSUMO ESPECÍFICO
DE ENERGIA E EMISSÕES DE CO₂**

Monografia apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do Curso de
Engenharia Química, para obtenção do título de
Bacharel.

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa
Orientadora

LAVRAS-MG

2023

*Aos meus pais, Euder e Valdirene, por todo
apoio concedido durante meus anos de
graduação.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Euder, por sempre me incentivar nos estudos e por me fazer crer que posso ser muito mais do que imagino.

À minha mãe Valdirene, por ter sido meu principal suporte durante meus anos de graduação e por sempre me compreender.

Ao meu irmão Luís Fernando, por se alegrar com minhas conquistas e sempre estar ao meu lado.

Aos meus avós Aparecida e Luiz, e à minha tia Shérída, por sempre terem me mantido em orações e por acreditarem em meu potencial.

Aos amigos que tive o privilégio de encontrar durante a graduação, que foram minha família em Lavras e fizeram meus dias mais felizes, especialmente à Luísa, que foi meu apoio na reta final do curso.

À Universidade Federal de Lavras e às entidades PQ Júnior e QICafé, por terem me moldado para um futuro profissional e pelos grandes aprendizados.

À ONG Engenheiros Sem Fronteiras, por me fazer enxergar o mundo de outra forma por meio do trabalho voluntário.

Ao Laboratório de Biologia Molecular - Instituto de Ciências Naturais da Universidade Federal de Lavras por terem cedido o uso do concentrador centrífugo, o que possibilitou a realização do presente trabalho.

Aos professores e técnicos da Engenharia Química, por todos os ensinamentos.

À professora Renata, por ter me orientado durante dois anos e me proporcionado muitas oportunidades e aprendizados.

A Deus, que me concedeu força, determinação, e nunca permitiu que eu duvidasse de mim mesma.

Muito obrigada!

“Se você deseja alcançar a excelência nas grandes coisas, desenvolve o hábito nas pequenas questões. A excelência não é uma exceção, é uma atitude persistente.”

(Colin Powell)

RESUMO

O Brasil se destaca como líder mundial na exportação de café e segundo maior consumidor da bebida. O café solúvel surge como uma resposta à busca por praticidade, sendo seu processo de produção crucial para determinar suas características finais. Os métodos tradicionais de secagem do extrato aquoso, *spray drying* e *freeze-drying*, apresentam desafios como degradação de sabor e aroma ou alto custo e tempo de processamento. A secagem em leito de espuma desponta como uma alternativa promissora, pois a espuma formada possui maior superfície disponível para a desidratação, resultando em taxas de transferência de massa mais elevadas e um processo mais rápido, e que pode ser realizado a temperaturas mais baixas. Portanto, os objetivos deste trabalho consistiram em: analisar a cinética de secagem e realizar caracterização das espumas produzidas a partir do extrato concentrado de café, e o efeito da temperatura de secagem em propriedades do pó de café solúvel obtido; avaliar o consumo específico de energia (SEC) e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas ao processo; e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais de cinética de secagem. Café do tipo arábica foi utilizado para extração simples com água deionizada e o extrato aquoso foi concentrado de 3 a 6 °Brix. A espuma formou-se a partir da adição de albumina 5,05% m/V e goma xantana 0,10% m/V ao extrato, e submetendo essa mistura a 6,5 min de agitação em uma batedeira operando a uma velocidade de rotação de 1066,67 rpm. A espuma foi caracterizada em relação à massa específica (ρ), viscosidade (η) e estabilidade (E) e, então, colocada em uma bandeja para posterior secagem à 50, 70 e 90 °C em uma estufa com circulação forçada de ar. Aos dados experimentais de umidade adimensional (MR) em função do tempo foram ajustados os modelos matemáticos de Lewis, Page, Henderson & Pabis, Midilli & Kucuk e Logarítmico, e foram determinados os valores de SEC e as emissões de CO₂ para cada condição experimental. Em adição, os pós produzidos foram caracterizados em função de sua umidade (M), cor, solubilidade, higroscopicidade (HG) e atividade antioxidante (AA). Os valores obtidos de ρ , η e E estão dentro das faixas encontradas na literatura para espumas utilizadas em secagem. A secagem utilizando temperatura de 90 °C foi mais rápida e, conseqüentemente, os valores de SEC e emissões de CO₂ foram menores. Para esta condição, foi obtido um pó com menor diferença de cor (ΔE) em relação ao extrato de café inicial. A taxa de secagem do processo foi predominantemente constante e o modelo de Midilli & Kucuk apresentou melhor ajuste aos dados de secagem. Os valores de M obtidos nas secagens à 70 e 90 °C (3 e 5 % b.s.) se encontram dentro da faixa permitida pela ANVISA, valores de HG (8,68 a 15,80 %) são próximos à literatura para cafés instantâneos, enquanto valores de AA foram abaixo do esperado. A solubilidade apresentou valores baixos (27,65 a 58,08 %), que podem ser justificados pela desnaturação da albumina, entretanto que se encontram dentro de faixas da literatura. Foi possível observar que a desidratação em camada de espuma mostra-se promissora para a produção de café solúvel.

Palavras-chave: secagem em camada de espuma, albumina, qualidade.

ABSTRACT

Brazil stands out as the world leader in coffee exports and the second-largest consumer of the beverage. Soluble coffee emerges as a response to the demand for convenience, with its production process being crucial in determining its final characteristics. Traditional methods of drying the aqueous extract, such as spray drying and freeze-drying, pose challenges such as flavor and aroma degradation, high costs, and processing time. Foam-bed drying emerges as a promising alternative, as the formed foam provides a larger surface area for dehydration, resulting in higher mass transfer rates and a faster process that can be carried out at lower temperatures. The objectives of this study were to analyze the drying kinetics, characterize the foams produced from concentrated coffee extract, investigate the effect of drying temperature on the properties of the obtained soluble coffee powder, evaluate the specific energy consumption (SEC), and carbon dioxide (CO₂) emissions associated with the process. Additionally, mathematical models were fitted to the experimental drying kinetics data. Arabica coffee was used for simple extraction with deionized water, and the aqueous extract was concentrated from 3 to 6 °Brix. The foam was generated by adding 5.05% w/v albumin and 0.10% w/v xanthan gum to the extract, followed by 6.5 minutes of agitation in a mixer operating at a rotation speed of 1066.67 rpm. The foam was characterized in terms of density (ρ), viscosity (η), and stability (E) before being placed in a tray for subsequent drying at 50, 70, and 90 °C in an oven with forced air circulation. Mathematical models, including Lewis, Page, Henderson & Pabis, Midilli & Kucuk, and Logarithmic, were applied to the experimental dimensionless moisture data (MR) over time. SEC values and CO₂ emissions were determined for each experimental condition. Additionally, the produced powders were characterized based on moisture content (M), color, solubility, hygroscopicity (HG), and antioxidant activity (AA). The obtained values of ρ , η , and E fall within the ranges found in the literature for foams used in drying. Drying at 90 °C was faster, resulting in lower SEC values and CO₂ emissions. Under this condition, a powder with a smaller color difference (ΔE) compared to the initial coffee extract was obtained. The drying rate was predominantly constant, and the Midilli & Kucuk model showed the best fit to the drying data. The M values obtained at 70 and 90 °C (3 and 5% d.b.) are within the range allowed by ANVISA, while HG values (8.68 to 15.80%) are close to literature values for instant coffees, and AA values were below expectations. Solubility showed low values (27.65 to 58.08%), possibly due to albumin denaturation, but within literature ranges. It was observed that foam-bed dehydration holds promise for soluble coffee production.

Keywords: foam mat drying, albumin, quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de produção do café solúvel.	15
Figura 2 – Curvas de (a) Cinética de Secagem e (b) Taxa de Secagem.	17
Figura 3 – Estrutura da espuma.	21
Figura 4 – (a) Pó de café e (b) aparato utilizados para a extração.	24
Figura 5 – (a) Concentrador centrífugo e (b) microtubos do tipo Eppendorf utilizados para a concentração do extrato aquoso de café.	24
Figura 6 – Aparatos para determinação da estabilidade das espumas.	26
Figura 7 – Material obtido nas etapas de extração, produção da espuma e secagem <i>foam mat.</i>	26
Figura 8 – Aparato para determinação do percentual de higroscopicidade.	30
Figura 9 - Adimensional de umidade em função do tempo de secagem do extrato de café em camada de espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.	35
Figura 10 – Curvas de taxa de secagem da espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.	35
Figura 11 – Dados experimentais de MR ajustados aos modelos (a) de Lewis, (b) de Page, (c) de Henderson & Pabis, (d) de Midilli & Kucuk e (e) Logarítmico.	37
Figura 12 – Café instantâneo obtido na secagem a 90 °C solubilizado em água.	42
Figura 13 – Imagens obtidas dos (a) extrato de café, (b) pó após secagem a 50°C (c) pó após secagem a 70°C, (d) pó após secagem a 90°C.	43
Figura 14 – Curvas padrões de (a) DPPH e (b) Trolox.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos matemáticos utilizados para ajuste aos dados experimentais.	27
Tabela 2 – Parâmetros de ajuste, constante de secagem, energia de ativação, coeficiente de determinação ajustado e soma dos quadrados dos resíduos obtidos pelos modelos.	36
Tabela 3 – SEC e emissão de CO ₂ para o processo de secagem em leito de espuma do extrato aquoso de café nas temperaturas de 50, 70 e 90 °C.....	39
Tabela 4 – Umidades finais em base seca e base úmida, solubilidade e higroscopicidade para o pó de café solúvel seco nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.	40
Tabela 5 – Parâmetros de cor dos pós obtidos pela secagem em leito de espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.....	43
Tabela 6 – Curvas das diferentes diluições do pó café (x) obtido a 50, 70 e 90 °C em DPPH e ABTS em função da absorbância (y).....	44
Tabela 7 – Atividade Antioxidante (AA) dos pós de café solúvel obtidos a 50, 70 e 90 °C pelos métodos de captura dos radicais DPPH e ABTS.	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. Café	14
2.2. Café solúvel	14
2.3. Generalidades sobre secagem	16
2.4. Secagem em camada de espuma	19
2.5. Espuma	21
2.6. Gastos energéticos e responsabilidade ambiental na indústria de alimentos... 23	
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1. Obtenção do extrato e formação da espuma	24
3.2. Ensaio de secagem em camada de espuma	26
3.3. Caracterização do pó de café solúvel	28
3.3.1. Umidade final.....	28
3.3.2. Análise de cor	28
3.3.3. Solubilidade	29
3.3.4. Higroscopicidade	30
3.3.5. Atividade antioxidante	30
3.3.5.1. Captura do radical DPPH.....	31
3.3.5.2. Captura do radical livre ABTS	31
3.4. Consumo específico de energia e emissões de CO ₂	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. Caracterização da espuma	34
4.2. Secagem	34
4.3. Consumo específico de energia e emissões de CO ₂	39
4.4. Caracterização do pó.....	40
4.4.1. Umidade final, solubilidade e higroscopicidade.....	40
4.4.2. Análise de cor	42
4.4.3. Atividade antioxidante	44
5. CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

O café é um dos produtos agrícolas mais importantes para a economia do Brasil, consolidando o país como o maior exportador mundial desta *commodity* e ocupando o segundo lugar entre os países que mais consomem a bebida. Ele exerce uma influência socioeconômica marcante tanto a nível nacional quanto em estados específicos como Minas Gerais, que se destaca como o principal produtor de café do país, respondendo por cerca de 50% da produção e sendo uma das mais importantes fontes de cafés especiais no Brasil (PERUZZOLO et al., 2019; ABIC, 2023). Adicionalmente, esse produto é evidenciado pelos efeitos benéficos na saúde, uma vez que estudos revelam que o consumo de café é auxiliar na redução do desenvolvimento de doenças como as cardiovasculares e as degenerativas de Alzheimer e Parkinson (WANDERLEY et al., 2017; OSSANI et al., 2021).

Dentre as variações de preparo da bebida, surge o café solúvel como resultado de uma busca por conveniência e praticidade no consumo, uma vez que que o processo de preparar café a partir de grãos moídos demanda o uso de equipamentos específicos (GALVANI, 2021). Em uma pesquisa realizada em 2017, o Relatório Internacional de Tendências do Café apontou uma crescente de cerca de 4,8% ao ano no mercado de café instantâneo e estima-se que as vendas do produto devem atingir US\$42,5 bilhões em 2025 (EMBRAPA, 2017).

No processo de fabricação do café solúvel, o café verde passa por diversas etapas até chegar ao pó final que é comercializado. Dentre estas etapas, destacam-se a concentração e a secagem do extrato aquoso de café. Na concentração, o extrato passa por um processo de evaporação parcial da água utilizando normalmente um termo centrífugo ou crio-concentrador, para posteriormente seguir para a etapa de desidratação (PUCRIO, [s. d.]).

O solúvel é produzido normalmente utilizando secagem por nebulização (*spray drying*), que se caracteriza como um processo rápido e eficiente. Entretanto, devido ao uso de elevadas temperaturas, pode acarretar em degradação de sabor e aroma do pó obtido ao final da secagem. Outra técnica que vem sendo utilizada para produzir café solúvel é a liofilização (*freeze-drying*), que preserva melhor as características sensoriais do produto; porém, possui alto custo e um elevado tempo de processamento (OLIVEIRA; PETROVICK, 2010; SILVA et al., 2016). Dentro desse contexto, a secagem em leito de espuma (*foam mat drying*) surge como uma alternativa às técnicas convencionais de desidratação, podendo ser realizada em um menor tempo, a baixas temperaturas e baixo custo (OLIVEIRA, 2019).

Por esse processo, materiais líquidos ou em forma de purê são combinados com um agente espumante para criar uma espuma, que é posteriormente submetida à desidratação em

camada fina. O uso de materiais espumados amplia a superfície disponível para a secagem, o que resulta em taxas de transferência de massa mais elevadas, levando a um processo mais rápido, e minimizando a degradação dos materiais (ELPÍDIO, 2021). A qualidade desse produto é importante, principalmente ao se falar de café, visto que há um contínuo aumento na demanda por produtos de café com maior sofisticação, como os *gourmet* e *premium*, demonstrando uma exigência crescente por parte do consumidor em relação à excelência (FRANCISCO; SANTOS; BENASSI, 2014).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar a produção de café solúvel utilizando a técnica de secagem por espuma através de um enfoque que contempla: (i) analisar o efeito da temperatura do ar de secagem na cinética de secagem das espumas produzidas a partir do extrato concentrado de café, bem como em propriedades qualitativas do pó de café solúvel (umidade, cor, solubilidade, higroscopicidade e atividade antioxidante); (ii) realizar a caracterização das espumas obtidas em relação à estabilidade, viscosidade e massa específica; (iii) avaliar o consumo específico de energia e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas ao processo; e (iv) ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de cinética de secagem, com o propósito de se obter a representação do comportamento da secagem do extrato concentrado de café.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Café

O café é uma das bebidas mais aceitas e consumidas ao redor do mundo, feita a partir dos grãos torrados da planta do café, oferecendo uma variedade de aromas e sabores únicos. Estima-se que cerca de 95% de todo o café consumido no mundo derive de apenas duas espécies: arábica (*Coffea arabica*) e robusta (*Coffea canephora*), sendo esses grãos provenientes de plantações situadas em países como Colômbia, Costa Rica, Arábia Saudita, Índia, Etiópia, Angola, Zaire, México e principalmente do Brasil, que é o maior produtor mundial. O café arábica se sobressai por oferecer uma maior qualidade, entretanto atinge preços mais elevados em comparação ao robusta, que por sua vez é amplamente utilizado em misturas ou *blends* e na indústria de café solúvel, por apresentar maior rendimento industrial devido à alta concentração de sólidos solúveis (ILLY; VIANNI, 1996; ABIC, 2021).

Atualmente, observa-se uma crescente demanda por cafés de alta qualidade por parte dos consumidores. Esta tendência reflete uma mudança no paladar e nas preferências dos apreciadores de café, que buscam experiências sensoriais mais refinadas e nuances de sabor distintas. Além disso, há um interesse crescente em compreender e valorizar a origem e o processo de produção do café, desde a colheita até a xícara. Como resultado, produtores estão cada vez mais focados na excelência, aprimorando técnicas e investindo em métodos de produção que garantam um produto de alta qualidade, atendendo assim a essa crescente demanda do mercado consumidor (AGÊNCIA MINAS, 2023; EPAMIG, 2008).

As etapas de torrefação, método de preparo, além da escolha da espécie do café influenciam fortemente na aceitação da bebida pelo consumidor, conforme estudo de Monteiro et al. (2010), comprovando a necessidade de se atentar à qualidade desse produto para comercialização.

2.2. Café solúvel

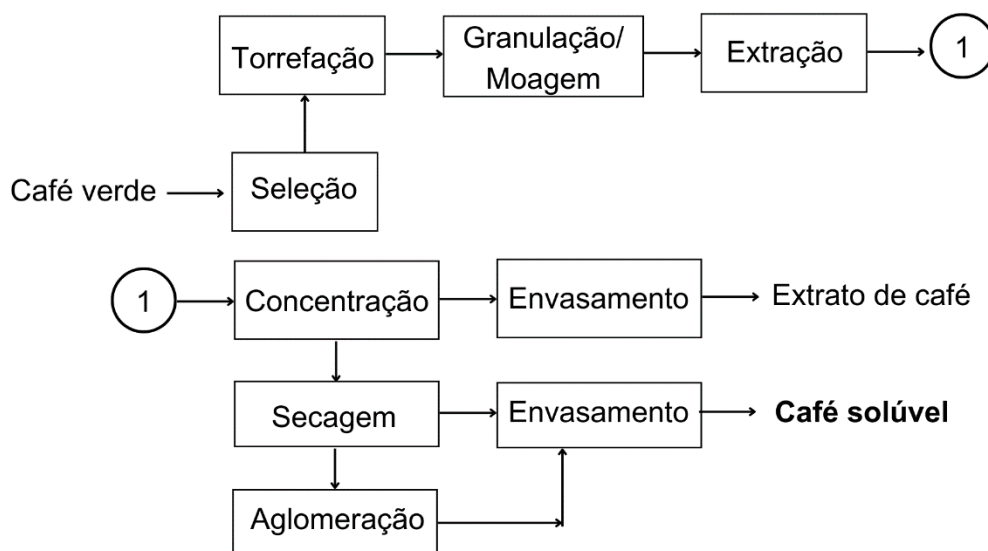
Foi-se falado sobre café solúvel pela primeira vez em 1901, quando Satori Kato, cientista japonês, criou um pó instantâneo e apresentou seu produto na Exposição Panamericana em Nova York. Em 1930, durante a crise mundial, o Brasil produzia muito mais café do que era demandado e, então, surgiu a necessidade de dar outro fim aos grãos. A pedido do Governo Vargas, a empresa suíça Nestlé desenvolveu o café instantâneo, que possibilitava uma bebida rápida e com características semelhantes às do café fresco (ABICS, 2020). Esse café

instantâneo, é obtido através da secagem de um extrato de café concentrado. Aproximadamente, utiliza-se 2,6 Kg de café em grão para a produção de 1 Kg de café solúvel (ABICS, 2023).

Atualmente, o café solúvel possui um grande nível de significância no mercado brasileiro, já que o país se consolida como o maior produtor e exportador deste. Corroborando este fato, tal *commodity* foi exportada para 100 países em 2022. O Estados Unidos lidera o *ranking* de países importadores do solúvel brasileiro, tendo adquirido em 2022, 8,4% a mais do que a quantidade de sacas adquirida em 2021. Além disso, o consumo interno do café desidratado atingiu um recorde histórico, ainda em 2022, totalizando 998.668 sacas, indicando que os brasileiros estão avançando na aceitação e respectivo consumo da bebida (ABICS, 2023).

A Figura 1 demonstra as etapas que são necessárias para produção do café solúvel, partindo do café verde, até o envasamento.

Figura 1 - Etapas de produção do café solúvel.



Fonte: Adaptado de PUCRIO (s.d.).

Na etapa de seleção, os grãos de café são escolhidos e higienizados para que o produto atenda à qualidade exigida pelo consumidor. Seguindo para a torrefação, os grãos são submetidos a temperaturas de 180 a 250 °C por oito a quinze minutos. Na etapa de granulação, o café torrado passa por moinhos, fracionando os grãos. O café torrado e moído passa, então, pela etapa de extração, na qual os sólidos solúveis são extraídos em água e, posteriormente, na etapa de concentração, parte da água é, então, retirada. O extrato de café concentrado pode ser

vendido para indústrias que fabricam doces e sobremesas ou prossegue para a etapa de secagem para a produção do café solúvel (PUCRIO, [s.d.]).

As técnicas de secagem mais utilizadas na produção do café solúvel são a liofilização e a secagem por aspersão (*spray drying*) (ABICS, 2023). A liofilização é uma técnica em que a substância a ser seca é congelada e o solvente (comumente água) é eliminado, em um primeiro momento, por sublimação e, posteriormente, por dessorção. Apesar de produzir alimentos de alta qualidade, esta técnica apresenta como desvantagens os elevados custos com equipamento e operação (MARQUES, 2008; TERRONI et al., [s. d.]). O solúvel do tipo *spray dried*, que representa o maior volume comercializado neste segmento, é produzido pulverizando o extrato concentrado, que será seco com ar quente. Contudo, por utilizar altas temperatura e pressão, o uso desta técnica pode levar a perdas nas propriedades organolépticas do produto (KIM et al., 2019; ABICS, 2023).

Após a secagem, o produto é embalado ou aglomerado (ver Figura 1). Na etapa de aglomeração, é adicionado vapor de água no café instantâneo previamente seco, o que resulta no café granulado. A etapa de envasamento, consiste na escolha de embalagens e empacotamento do pó solúvel obtido (PUCRIO, [s.d.]).

2.3. Generalidades sobre secagem

A secagem é um método tradicionalmente utilizado para reduzir a umidade de materiais. É uma das técnicas mais antigas utilizadas na preservação de alimentos, reduzindo a velocidade dos mecanismos de deterioração (FRANCO, 2015). Essa desidratação pode acontecer de várias formas a depender do modo de transferência de calor utilizado, porém, em geral, pode ser classificada como: secagem convectiva, quando o material úmido é seco por correntes de ar aquecido, e secagem condutiva, quando há um contato direto entre o elemento que aquece e o material úmido (MCCABE, 2005; FELLOWS, 2018).

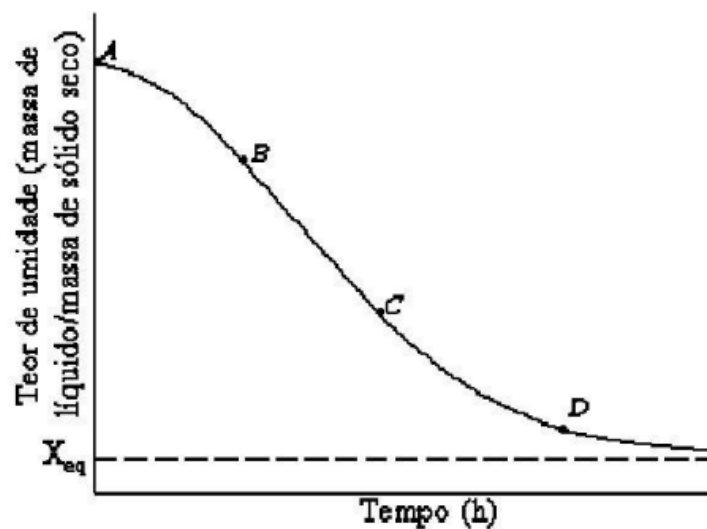
A secagem convectiva utilizando ar quente consiste no método mais empregado industrialmente para a desidratação de alimentos, podendo ser efetuada em uma grande variedade de equipamentos e configurações. A troca de calor entre o ar aquecido e o alimento são principalmente de natureza convectiva; porém, a condução e a radiação também podem estar presentes. A secagem condutiva é mais eficiente em termos de velocidade de secagem; no entanto, é mais ‘agressiva’ e pode expor o alimento a temperaturas mais elevadas (ANDRADE, 2023).

Durante a secagem, a umidade é removida através de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa. A transferência de calor refere-se à movimentação de energia térmica de uma área de temperatura mais alta para uma de temperatura mais baixa, enquanto a transferência de massa implica na migração de substâncias de uma região de alta concentração para uma de baixa concentração (INCROPERA, 2008).

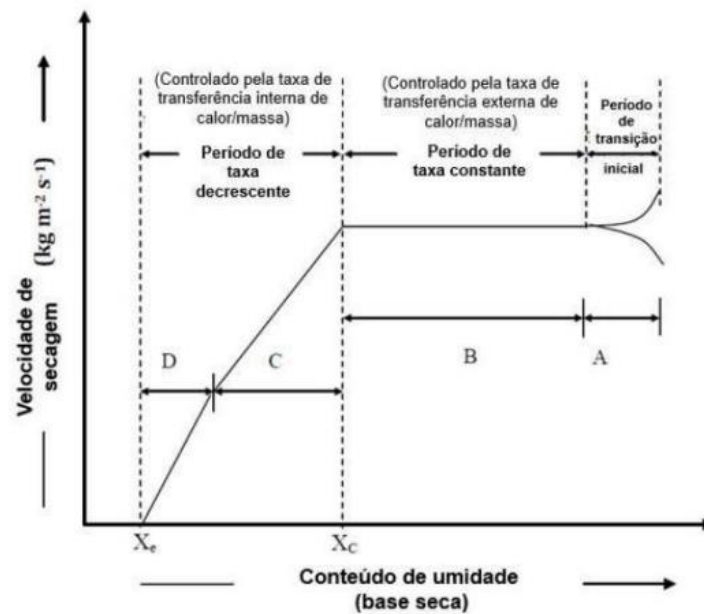
No início do processo de secagem convectiva, o ar aquecido transfere calor para o material úmido, causando a evaporação do líquido da superfície. Concomitantemente, ocorre a transferência de vapor d'água superficial para a corrente de ar, devido à diferença de pressão de vapor em ambas as fases. A umidade presente no interior do material é, então, deslocada para a superfície através da transferência de massa por difusão, visto que a água da superfície é continuamente removida por convecção e isso gera um gradiente de concentração de água. (GEANKOPLIS, 2003; MCCABE, 2005).

A cinética de secagem é uma análise utilizada para determinar o comportamento da umidade de um material ao longo do tempo de secagem (MATOS et al., 2022). A partir de dados experimentais de umidade do material em função do tempo é possível obter curvas de cinética (Figura 2-a) e taxa (Figura 2-b) de secagem.

Figura 2 – Curvas de (a) Cinética de Secagem e (b) Taxa de Secagem.



(a)



(b)

Fonte: (a) RICHARDSON et al. (2002) e (b) FRANCO (2015).

A partir da Figura 3-a, é possível visualizar que a umidade do material decresce ao longo do tempo até atingir a umidade de equilíbrio (X_{eq}), ponto no qual não é possível remover mais água desse sólido e a massa se estabiliza. Na Figura 3-b tem-se a demonstração gráfica dos períodos de secagem.

O trecho A corresponde à fase de adaptação ou período de transição inicial, na qual a taxa de secagem aumenta à medida que se retira água do material, sendo uma fase geralmente curta e que não é observada em todos os ensaios de secagem. O trecho B corresponde à fase em que a taxa de secagem é constante, ou seja, a migração interna de umidade é suficiente para compensar a evaporação superficial, e a convecção controla o processo. Os trechos C e D correspondem às fases de taxa de secagem decrescente, na qual a taxa cai de forma acentuada à medida que a umidade é retirada. À medida que o produto seca, a transferência de umidade de dentro da partícula para sua superfície diminui progressivamente. Quando o fornecimento de umidade para a superfície é inferior à taxa de evaporação, a umidade na superfície começa a diminuir rapidamente e se aproxima do teor de umidade de equilíbrio (X_e), correspondente à umidade relativa do ar na isoterma de dessorção do material. A partir desse momento, tem-se o ponto de umidade crítica (X_c) e a difusão interna passa a ser o fator limitante da taxa de secagem, não mais a convecção (ANDRADE, 2023).

A obtenção dessas curvas é importante para a coleta de informações do processo de secagem, como o tempo que é necessário para reduzir a umidade de um material até uma umidade que se deseje alcançar ou a descrição dos mecanismos que controlam o processo (ARAÚJO et al., 2021).

2.4. Secagem em camada de espuma

A secagem em camada de espuma é um método que vem sendo investigado na desidratação de materiais líquidos ou na forma de purês, por possuir vantagens como um menor tempo de desidratação, possibilidade de processamento de materiais difíceis de secar e maior retenção de propriedades desejadas no produto final, como capacidade de reidratação e conservação de voláteis (KUDRA; RATTI, 2008; KANDASAMY et al., 2012; JAKUBCZYK et al., 2011). Essa técnica é muito útil ao se tratar da desidratação de materiais sensíveis ao calor e/ou viscosos, que não são suscetíveis a secagem por *spray drying*. Por esta técnica, um líquido ou purê é agitado na presença de agentes espumantes e/ou estabilizantes para a formação de uma espuma, que será seca posteriormente produzindo materiais em pó (KANDASAMY et al., 2012; ARAÚJO et al., 2017).

Existem algumas formas de incorporar ar na solução, estruturando a espuma, sendo elas: batimento, agitação e borbulha. O batimento pode ser realizado por meio de misturadores manuais ou automáticos, e através da ação destes, o ar é preso dentro do líquido. Ao ser preso, a bolha de gás é grande, porém com o aumento da agitação mecânica causada pelo misturador, ela se quebra em bolhas menores. Esse constante batimento pode provocar coalescência à espuma, o que torna importante avaliar parâmetros como tempo e velocidade de batimento nas propriedades da espuma produzida. Na agitação, o líquido é chacoalhado vigorosamente utilizando qualquer recipiente. Por ser um método que demanda um longo tempo para produzir pouca espuma é, portanto, raramente utilizado. O método de borbulha, consiste na injeção de gás para produção de bolhas de tamanhos uniformes e a quantidade de espuma produzida depende da proporção de agente espumante utilizada na solução (HARDY; JIDEANI, 2017).

Na secagem em camada de espuma, a taxa de secagem é significativamente aumentada, se comparada a outros métodos, pela formação da espuma que amplifica a interface gás-líquido. Em consequência, há um aumento da área superficial disponível para o ar de secagem, diminuindo o tempo que o material leva para ser seco, o que torna essa técnica possível de ser realizada utilizando-se menores temperaturas. A desidratação rápida pode ser explicada também pelo deslocamento da umidade por capilaridade através das lamelas (Figura 3) que

separam as bolhas de gás (KANDASAMY et al., 2012; HARDY; JIDEANI, 2017). Em adição, o menor período gasto na secagem pode ser vantajoso visando a não degradação de propriedades que se almeja preservar no produto.

Na literatura especializada já é possível encontrar muitos estudos que utilizam a secagem em camada de espuma para a desidratação de alimentos diversos como polpa de jaca (PRIYADARSHINI et al., 2023), suco de tomate (BELAL et al., 2022), leite de coco (SHAMEENA BEEGUM et al., 2022), polpa de açaí (COLAÇO et al., 2022), folhas e talos de couve (BORGES et al. 2022), dentre outros.

Contudo, poucos estudos dedicados a avaliar a secagem em espuma do extrato aquoso de café foram encontrados. Silva et al. (2020) conduziram um estudo sobre a desidratação em leito de espuma do extrato concentrado de café a fim de avaliar a cinética de secagem do processo e ajustar o modelo matemático de Page às curvas de secagem. Como resultados, os autores obtiveram um ótimo ajuste do modelo de Page, evidenciado por coeficientes de determinação superiores a 99%. Além disso, constatou-se que a temperatura desempenha um papel determinante na velocidade de perda de umidade do produto, resultando em tempos de secagem mais curtos à medida que a temperatura aumenta.

Maciel et al. (2022) utilizaram a técnica para desidratar espumas produzidas a partir de extrato de café utilizando diferentes aditivos (maltodextrina e proteína do soro do leite (*whey protein*)). Os resultados demonstraram valores satisfatórios para propriedades como solubilidade e atividade antioxidante do pó, independentemente do emulsificante utilizado, mostrando que a secagem em espuma produz solúvel de alta qualidade.

O extrato de café é comumente seco pelos processos de *spray* e *freeze drying* e esses foram os métodos estudados por Shofinita et al. (2023). Os autores realizaram uma revisão bibliográfica sobre o tema e concluíram que diversas técnicas de desidratação podem ser utilizadas para o extrato de café. Entretanto, cada uma delas afeta alguma propriedade físico-química do pó. Os autores sugerem ainda o uso de técnicas mais avançadas para a obtenção de um produto com maior qualidade, como o processo de encapsulamento.

Nesse sentido, é válido citar a secagem em leito de espuma para a desidratação do extrato aquoso de café. Vimercati et al. (2022) conduziram um estudo com o objetivo de avaliar os métodos de encapsulamento por secagem em camada de espuma, *spray* e *freeze drying* para produção de solúvel a partir de extratos de café. As propriedades físico-químicas dos pós foram analisadas, incluindo atividade de água, umidade, molhabilidade, higroscopicidade,

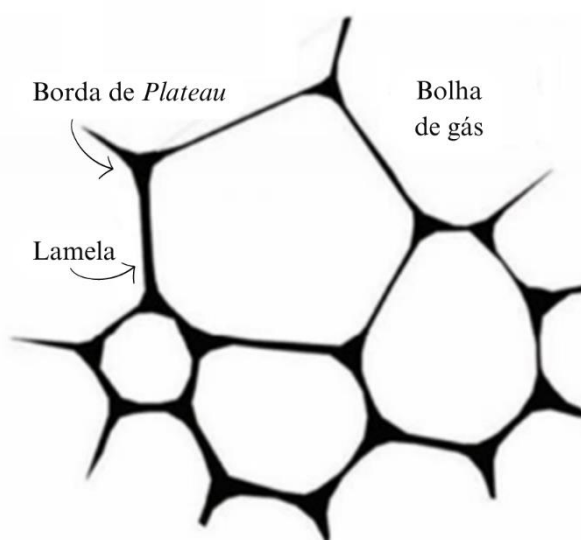
solubilidade, cor, atividade antioxidante e teor fenólico total. Todos os métodos resultaram em pós com níveis desejáveis de atividade de água, teor de umidade e higroscopicidade, indicando estabilidade para armazenamento e elevado conteúdo de compostos bioativos. A utilização de temperaturas mais elevadas durante a secagem da espuma resultou em pós com maior eficiência de encapsulamento e maior molhabilidade. Assim, este estudo demonstrou que a secagem em espuma pode ser considerada um método eficaz e promissor para encapsular compostos bioativos provenientes do extrato de café.

2.5. Espuma

A espuma é um sistema bifásico, já que pode ser compreendida como uma dispersão de gás em uma fase líquida ou sólida. Ademais, considera-se esse sistema instável termodinamicamente, devido ao fato de que a destruição da bolha de gás reduz a alta área superficial da espuma e a energia livre, sendo, então, um processo que acontece naturalmente. A partir disso, conforme o tempo passa, a espuma tende a coalescer (FIGUEREDO et al., 1999; ARZHAVITINA; STECKEL, 2010).

Entre duas bolhas de gás existe uma camada fina de líquido chamada de lamela, e o espaço onde ocorre o encontro entre três lamelas é chamado de borda de *Plateau*. Nessa região há uma baixa pressão e, portanto, o líquido possui a tendência de escoar por esses canais. A progressão desse fenômeno é determinante no tempo de vida da espuma (FIGUEREDO et al., 1999). Observa-se na Figura 3 as regiões especificadas.

Figura 3 – Estrutura da espuma.



Fonte: Adaptado de Wilde e Clark (1996).

Com o intuito de formar uma emulsão estável, é comumente necessária a presença de aditivos, como os agentes espumantes e os estabilizantes, cuja presença confere alta qualidade à emulsão. Agentes espumantes, ao serem adicionados na solução, difundem-se em direção à interface gás-líquido e estabilizam a bolha de gás devido à formação de uma monocamada adsorvida. A concentração e o tipo desses agentes desempenham um papel fundamental nas propriedades da espuma e nas propriedades obtidas no pó, produto final do processo de secagem (FIGUEREDO et al., 1999; ROHILLA; MAHANTA, 2022).

Um aditivo comum utilizado na indústria alimentícia é a albumina, proteína do ovo, que atua como emulsificante entre a fase contínua e de dispersão para estabilizar a espuma. A albumina do ovo contém até 40 proteínas diferentes, e se comparada com outras proteínas, normalmente fornece as melhores propriedades de formação da espuma (HARDY; JIDEANI, 2017).

Muitos estudos têm investigado a secagem em leito de espuma com o uso de albumina como aditivo. Cardoso et al. (2023) conduziram experimentos de secagem em espuma de polpa de goiaba e melancia incorporando albumina, e observaram resultados positivos na composição fenólica e na atividade antioxidante do pó produzido. Ao utilizar albumina e proteína do soro do leite como aditivos na secagem do suco de cenoura, Cakmak e Ozyurt (2023) observaram resultados promissores em termos de molhabilidade, higroscopicidade e atividade antioxidante nos pós obtidos com o uso exclusivo de albumina. No entanto, essas características foram mais aprimoradas ao combinar a albumina com a proteína do soro do leite. Thuy et al. (2022) realizaram secagem em camada de espuma de extrato de amoreira e, ao utilizar albumina, verificaram boas propriedades na espuma, como alta estabilidade.

Durante o processo de secagem *foam mat*, a massa específica e a estabilidade da espuma são propriedades que se destacam como as mais expressivas. É desejável que a espuma possua uma menor massa específica, já que isso significa uma maior incorporação de ar na solução e maior área superficial disponível para troca de calor e massa. Além disso, a espuma deve permanecer estável, retendo sua estrutura típica, ao longo da secagem. Isto garante uma secagem mais rápida além do fácil desprendimento do material do recipiente de secagem (HARDY; JIDEANI, 2017; ARZHAVITINA; STECKEL, 2010; THUWAPANICHAYANAN et al., 2008).

Portanto, é crucial conduzir um estudo para avaliar e escolher os aditivos (tipo e quantidade), tempo e velocidade de batimento que assegurem condições ideais ao processo (CRUZ, 2013; MACIEL, 2017).

2.6. Gastos energéticos e responsabilidade ambiental na indústria de alimentos

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (2023), a indústria alimentícia tem representado cerca de 10,6% do PIB brasileiro, sendo também o segundo setor que mais consome energia elétrica no país (EPE, 2023). Esses números refletem a magnitude do setor de alimentos e bebidas no Brasil, o qual se destaca como o maior do país.

Dada a relevância desse cenário, surge a importância de abordar a sustentabilidade e estratégias para reduzir os gastos com energia elétrica. Na indústria de alimentos, os investimentos em relação à sustentabilidade abrangem diversas áreas, incluindo a minimização do consumo de recursos naturais, qualificação profissional, iniciativas sociais voltadas para o progresso das comunidades locais e implementação de estratégias para o gerenciamento de resíduos (ABIA, 2023).

Na COP26, 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, realizada em 2021, foi discutido o risco do aumento das mudanças climáticas, e o Brasil fez a promessa de reduzir as emissões de gases poluentes pela metade até 2030 e zerar o desmatamento 2 anos antes. Portanto, realizar cálculos de parâmetros como consumo específico de energia e emissão de dióxido de carbono de um processo é essencial para uma gestão responsável e sustentável dos recursos, especialmente em um contexto de preocupações crescentes com as mudanças climáticas e a necessidade de transição para uma economia mais sustentável.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Obtenção do extrato e formação da espuma

Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizado café do tipo 100% Arábica (Figura 4-a e b), fornecido pela Fazenda Três Porteiras, localizada em Ingaí, MG.

Figura 4 – (a) Pó de café e (b) aparato utilizados para a extração.



Fonte: Do autor (2023).

Para obter o extrato aquoso, foram utilizados 50 g de pó de café em um processo de extração simples com filtro de papel, sendo o aparato utilizado representado na Figura 4-b. Foram empregados 300 mL de água deionizada previamente aquecida a 90 °C. O extrato resultante foi concentrado de 3 a 6 °Brix em microtubos do tipo Eppendorf, com capacidade de 2 mL cada, dispostos em um Concentrador centrífugo a vácuo (Eppendorf – modelo 5301) a 1400 rpm, conforme ilustrado nas Figuras 5-a e 5-b. Configurou-se o concentrador para evaporação de soluções aquosas e utilizou-se a temperatura de 60 °C como *setpoint*, garantindo assim que a temperatura no interior da centrífuga não superasse 50 °C.

Figura 5 – (a) Concentrador centrífugo e (b) microtubos do tipo Eppendorf utilizados para a concentração do extrato aquoso de café.



Fonte: Do autor (2023).

O extrato concentrado passou pelo processo de formação de espuma, no qual foi adicionada albumina como agente espumante (marca Asa Power) com uma concentração de 5,05% m/V, juntamente com 0,10% m/V de goma xantana (marca Avante Consultoria e Ingredientes), que foi utilizada como estabilizante. A mistura foi submetida a 6,5 min de agitação mecânica em uma batedeira doméstica (Mondial, modelo B-05NP, 350 W), operando a uma velocidade de rotação de 1066,67 rpm, sendo essas condições operacionais definidas em estudo anterior (LOPES et al., 2022).

A espuma foi, então, caracterizada em relação à massa específica (ρ), viscosidade (η) e estabilidade (E). A massa específica foi determinada em duplicata por meio de picnometria, seguindo a Equação 1, e utilizando picnômetros de 10 e 25 mL, que foram previamente calibrados com água destilada.

$$\rho = \frac{m_{\text{espuma}}}{V_{\text{real}}} \quad (1)$$

em que m_{espuma} é a massa de espuma utilizada na picnometria e V_{real} é o volume real do picnômetro.

A viscosidade da espuma foi medida em duplicata por intermédio de um viscosímetro Brookfield (modelo NDJ-5S) com rotor 3 e 60 rpm como velocidade de rotação.

A estabilidade foi determinada conforme Barmore (1934), na qual dois aparatos compostos por peneiras, funis de vidro e provetas (Figura 6) foram colocados dentro de uma estufa de convecção forçada de ar (modelo SL-102) na temperatura de 70 °C e, após 2h, mediu-se o volume que coalesceu ($V_{\text{coalescido}}$). Calculou-se, então, o valor da propriedade seguindo a Equação 2.

$$E = \left(1 - \frac{V_{\text{coalescido}} \cdot \rho_{\text{espuma}}}{10}\right) \cdot 100 \quad (2)$$

Vale ressaltar que as medidas de estabilidade foram realizadas utilizando $T = 70$ °C, pois esta foi a temperatura média utilizada nos ensaios de secagem.

Figura 6 – Aparatos para determinação da estabilidade das espumas.



Fonte: Do autor (2023).

3.2. Ensaios de secagem em camada de espuma

Após caracterizada, a espuma foi colocada em uma bandeja circular com 1,0 cm de espessura e 20,0 cm de diâmetro e, então, submetida à secagem em uma estufa com circulação de ar forçada (modelo SL-102). Esse procedimento foi realizado em duplicata para cada uma das temperaturas do ar de secagem avaliadas: 50, 70 e 90 °C. Na Figura 7 tem-se representado o material que foi obtido após extração do café, produção da espuma e secagem.

Figura 7 – Material obtido nas etapas de extração, produção da espuma e secagem *foam mat*.



Fonte: Do autor (2023).

Após inserida na estufa, a massa da espuma foi medida a cada 10 min durante os primeiros 100 min de secagem e, então, a cada 20 min até que uma diferença inferior a 0,01g fosse obtida em três medições consecutivas. Em seguida, o material foi raspado da bandeja com

o auxílio de uma espátula e colocado em uma placa de Petri para que a umidade final fosse determinada via método gravimétrico em estufa a $105 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24h (AOAC, 1990).

O teor de umidade de equilíbrio (M_{eq}) foi, então, calculado a partir da massa de umidade remanescente no material ao final da secagem ($m_{\text{água residual}}$) e a massa da amostra seca após 24 horas na estufa ($m_{\text{matéria seca}}$), conforme Equação 3.

$$M_{eq} = \frac{m_{\text{água residual}}}{m_{\text{matéria seca}}} \quad (3)$$

Dessa forma, a umidade adimensional (MR - *Moisture Ratio*) foi calculada ao longo do tempo de secagem, conforme a Equação 4, considerando a umidade da espuma no instante avaliado (M), a umidade de equilíbrio (M_{eq}) e a umidade inicial da amostra (M_i).

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (4)$$

A taxa de secagem (DR - *Drying Rate*) foi determinada a partir da variação da umidade da amostra em cada instante avaliado (dM) e da variação do tempo (dt), seguindo a Equação 5.

$$DR = - \frac{dM}{dt} \quad (5)$$

Os dados de MR calculados foram usados para a construção de curvas de secagem em função do tempo. A estes dados experimentais foram ajustados diferentes modelos matemáticos de secagem em camada fina, conforme descritos na Tabela 1, por meio da ferramenta Solver do *software* Microsoft Excel.

Tabela 1 – Modelos matemáticos utilizados para ajuste aos dados experimentais.

Modelo	Equação	Referências
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Andrade et al. (2006)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Maciel et al. (2021)
Henderson & Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	Maciel et al. (2021)
Midilli & Kucuk	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$	Midilli e Kucuk (2003)
Logarítmico	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	Sousa et al. (2011)

Fonte: Do autor (2023).

em que “n”, “a”, “b” e “c” são parâmetros de ajuste dos modelos e a constante de secagem “k” foi substituída pela Equação de Arrhenius (Equação 6), considerando “ k_0 ” a constante inicial de secagem, “ E_a ” a energia de ativação, “R” a constante universal dos gases e “T” a temperatura do ar de secagem.

$$k = k_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (6)$$

Para avaliar o ajuste dos modelos foram utilizados como critério a soma do quadrado dos resíduos (SQR) (Equação 7), que deve ser minimizada, e o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) (Equação 8), que leva em consideração o número de parâmetros do modelo e deve ser próximo de 1.

$$SQR = \sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{mod})^2 \quad (7)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(N-1)}{(N-p)} \cdot (1 - R^2) \quad (8)$$

em que “ MR_{exp} ” é a umidade adimensional experimental, “ MR_{mod} ” é a umidade adimensional calculada pelo modelo, “ N ” é a quantidade de dados de “ MR ” que foram utilizados, “ p ” é o número de parâmetros do modelo e “ R^2 ” é o coeficiente de determinação.

3.3. Caracterização do pó de café solúvel

3.3.1. Umidade final

O teor de umidade é um parâmetro importante a ser analisado já que a maioria dos países importadores e exportadores de café regulamentam esse teor como um dos padrões de qualidade para comercialização (SHOFINITA et al., 2023). O teor de umidade final do pó produzido (M) pelos diferentes ensaios de secagem foi determinado em base seca (b.s.) e base úmida (b.u.) seguindo as Equações 9 e 10.

$$M_{b.s.} = \frac{(m_{material\ úmido} - m_{matéria\ seca})}{m_{matéria\ seca}} \quad (9)$$

$$M_{b.u.} = \frac{(m_{material\ úmido} - m_{matéria\ seca})}{m_{material\ úmido}} \quad (10)$$

nas quais, “ $m_{material\ úmido}$ ” é a massa do pó obtida ao final da secagem e “ $m_{matéria\ seca}$ ” é a massa do pó após 24h na estufa à temperatura de 105 ± 3 °C.

3.3.2. Análise de cor

A cor das amostras de pó de café solúvel foi avaliada utilizando a diferença total de cor (ΔE) e o índice de escurecimento (BI – *Browning index*). Esses índices utilizam as coordenadas L^* (luminosidade), a^* (transição vermelho +/- verde -) e b^* (transição amarelo +/- azul -), da escala CIE $L^*a^*b^*$.

Para a obtenção dos parâmetros L , a e b , ao final de cada secagem, foram feitas fotografias do pó obtido com um *smartphone* Samsung Galaxy S20 FE. Para o cálculo de ΔE e

BI, os parâmetros fornecidos pelo *software* Adobe Photoshop foram inicialmente transformados para o formato padrão (L^* , a^* e b^*) por meio das Equações 11, 12 e 13 (YAM; PAPADAKIS, 2004; VISHWANATHAN et al., 2010).

$$L^* = \frac{L}{255} \cdot 100 \quad (11)$$

$$a^* = \frac{240 \cdot a}{255} - 120 \quad (12)$$

$$b^* = \frac{240 \cdot b}{255} - 120 \quad (13)$$

Também foram capturadas imagens do extrato aquoso de café e as coordenadas de cor obtidas foram convertidas para o formato padrão (L_0^* , a_0^* e b_0^*) e utilizadas como referência com o objetivo de quantificar a variação de cor decorrente do processo de secagem. ΔE foi, então, calculada por meio da Equação 14.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (14)$$

O índice de escurecimento emprega as mesmas coordenadas para denotar o desenvolvimento da tonalidade marrom, e pôde ser determinado obtendo a coordenada “x” por meio da Equação 15 e, conseqüentemente, BI pela Equação 16.

$$x = \frac{a^* + (1,75 \cdot L^*)}{(5,645 \cdot L^*) + a^* - (3,012 \cdot b^*)} \quad (15)$$

$$BI = \frac{100 \cdot (x - 0,31)}{0,17} \quad (16)$$

3.3.3. Solubilidade

A solubilidade foi determinada seguindo a metodologia descrita por Eastman e Moore (1984) com as adaptações propostas por Souza, Maques e Oliveira (2015). Inicialmente, 0,14 g do pó de café solúvel foram adicionadas em 14 mL de água deionizada e agitou-se essa mistura em agitador magnético por 5 min. Logo após, a solução foi transferida para tubos e centrifugada a 3000 rpm em uma centrífuga (Fanem Modelo – Excelsa i 2206) por 15 min. Após esse período, 6 mL do sobrenadante foram transferidos para uma placa de Petri, a qual foi colocada em uma estufa a 110 °C por 12 horas. O percentual de solubilidade foi então calculado por meio da Equação 17, na qual “ m_{residual} ” representa a massa do material seco, “ V_{al} ” é o volume da alíquota do sobrenadante, “ V_i ” é o volume inicial da solução e “ m_i ” é a massa inicial do pó solúvel.

$$\text{Solubilidade} = \frac{m_{\text{residual}} \cdot V_i}{V_{\text{al}} \cdot m_i} \cdot 100 \quad (17)$$

3.3.4. Higroscopicidade

Para determinação do percentual de higroscopicidade, seguiu-se a metodologia descrita por Caparino et al. (2012). Cerca de 1,0 grama de café solúvel foi depositado em um recipiente aberto, inserido dentro de um frasco de vidro selado contendo uma solução saturada de NaCl (aproximadamente 75% de umidade), por 7 dias a 25 °C, sendo esse aparato representado na Figura 8.

Figura 8 – Aparato para determinação do percentual de higroscopicidade.



Fonte: Do autor (2023).

Após o período considerado, a massa do pó foi pesada e o percentual de higroscopicidade (HG), equivalente a 1 g de umidade absorvida por 100 g de sólido seco, pôde ser calculado por meio da Equação 18:

$$\text{HG} = \frac{\Delta m / (m_i + M_{b.u.})}{1 + \Delta m / m_i} \quad (18)$$

em que “ Δm ” é o incremento na massa do pó após o equilíbrio, “ m_i ” é a massa inicial de solúvel e “ $M_{b.u.}$ ” é a umidade do pó em base úmida.

3.3.5. Atividade antioxidante

A atividade antioxidante do café solúvel foi determinada seguindo duas metodologias: a captura do radical DPPH e a captura do radical livre ABTS (RUFINO et al., 2007a; RUFINO et al., 2007b). As soluções com o pó solúvel foram preparadas, utilizando água deionizada a

uma temperatura de 90 °C, em diferentes concentrações (0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 mg/mL), e foram feitas em duplicata.

3.5.5.1. Captura do radical DPPH

Inicialmente, a curva padrão do DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil – da marca Sigma-Aldrich) (0,06 mM) foi construída utilizando-se soluções deste reagente em álcool metílico, com concentrações variando de 10 a 60 µM. Álcool metílico foi utilizado como branco e as leituras de absorbância foram feitas a 515 nm em um espectrofotômetro visível (Bel Photonics – modelo V-M5). Com a curva obtida (Equação 19), é possível calcular o consumo de DPPH.

$$y_1 = a_1 \cdot x_1 + b_1 \quad (19)$$

na qual y_1 é metade da absorbância inicial de solução controle, a_1 e b_1 são constantes obtidas por regressão linear e x_1 é o consumo de DPPH, a ser obtido.

Foi adicionado 0,1 mL de cada solução preparada com o pó e 0,1 mL de solução controle, separadamente, em 3,9 mL do radical DPPH, sendo essas misturas homogêneas em um agitador de tubos (modelo VX-28). Logo em seguida, álcool metílico foi utilizado como branco, e foram realizadas as leituras de absorbâncias a 515 nm, após estabilização. A partir dessas leituras, foi construída uma curva de concentração em função do tempo (Equação 20), tornando possível o cálculo da atividade antioxidante total (AAT) por meio Equação 21.

$$y_2 = a_2 \cdot x_2 + b_2 \quad (20)$$

$$AAT = \frac{x_2}{x_1} \quad (21)$$

em que y_2 é metade da absorbância inicial de solução controle, a_2 e b_2 são constantes obtidas por regressão linear e x_2 é a amostra necessária para reduzir em 50% a concentração inicial do radical DPPH.

3.5.5.2. Captura do radical livre ABTS

A curva padrão do trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametacromano-Ácido2-carboxílico – da marca Sigma-Aldrich) (2,0 mM) foi construída utilizando-se soluções deste reagente em álcool etílico, com concentrações variando de 100 a 1500 µM. Adicionou-se 30 µL de cada solução em 3,0 mL do radical ABTS (2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolona-6-sulfônico) – da marca Sigma-Aldrich). Álcool etílico foi utilizado como branco e as leituras de absorbância foram

feitas a 734 nm em um espectrofotômetro visível (Bel Photonics – modelo V-M5). Com a curva obtida (Equação 22), é possível calcular a absorvância correspondente a 1000 μM de trolox.

$$y_3 = a_3 \cdot x_3 + b_3 \quad (22)$$

em que x_3 é equivalente à 1000 μM de trolox, a_3 e b_3 são constantes obtidas por regressão linear e y_3 é a absorvância correspondente a 1000 μM de trolox, que deve ser encontrada.

Então, foi adicionado 30 μL de cada solução preparada com o pó de café solúvel em 3,0 mL do radical ABTS, sendo essa mistura homogeneizada em um agitador de tubos (modelo VX-28). Logo em seguida, álcool etílico foi utilizado como branco, e foram realizadas as leituras de absorvâncias a 734 nm, após 6 min de mistura. A partir dessas leituras, foi construída uma curva de concentração em função do tempo (Equação 23), tornando possível o cálculo da atividade antioxidante total (AAT) por meio Equação 24.

$$y_4 = a_4 \cdot x_4 + b_4 \quad (23)$$

$$\text{AAT} = \frac{1000}{x_4} \quad (24)$$

em que y_4 é equivalente à y_3 (absorvância correspondente a 1000 μM de trolox), a_4 e b_4 são constantes obtidas por regressão linear e x_4 é a diluição da amostra que identifica 1000 μM de trolox.

3.4. Consumo específico de energia e emissões de CO_2

Para a quantificação do consumo específico de energia (SEC – *Specific Energy Consumption*) foi identificada a maior umidade registrada do pó ao final de todos os ensaios de secagem realizados e, em seguida, calculou-se a quantidade de água evaporada do material até o instante em que essa umidade foi alcançada. A potência total (P_{total}) foi medida na estufa com o auxílio de um Wattímetro Minipa (modelo ET-4080) para todas as temperaturas utilizadas nas secagens (50, 70 e 90°C).

Os valores de SEC foram, então, determinados pela Equação 25, relacionando a potência total consumida (P_{total}), o tempo de secagem (t) e a massa de água que foi evaporada até o instante “ t ”. Este parâmetro desempenha um papel crucial na avaliação da eficácia das condições de secagem avaliadas.

$$\text{SEC} = \frac{P_{\text{total}} \cdot t}{m_{\text{água evaporada}}} \quad (25)$$

As emissões de dióxido de carbono associadas ao processo foram, por fim, estimadas multiplicando a energia elétrica consumida nos ensaios de secagem pelo fator de $0,0426 \text{ t}_{\text{CO}_2}\text{MWh}^{-1}$, que corresponde à emissão média anual de CO_2 em 2022, conforme Equação 26 (BRAZIL, 2023).

$$\text{Emissão de CO}_2 = P_{\text{total}} \cdot t \cdot 0,0426 \quad (26)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da espuma

A massa específica, viscosidade e estabilidade da espuma produzida com a incorporação de 5,05% m/V de albumina, 0,10% m/V de goma xantana e usando tempo e velocidade de batimento iguais a 6,5 min 1066,67 rpm, respectivamente, foram determinadas conforme descrito no item 3.1. Os valores obtidos foram $\rho = 0,25 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$, $\eta = 1381 \pm 49,50 \text{ mPa.s}$ e $E = 96,85 \pm 0,18 \%$.

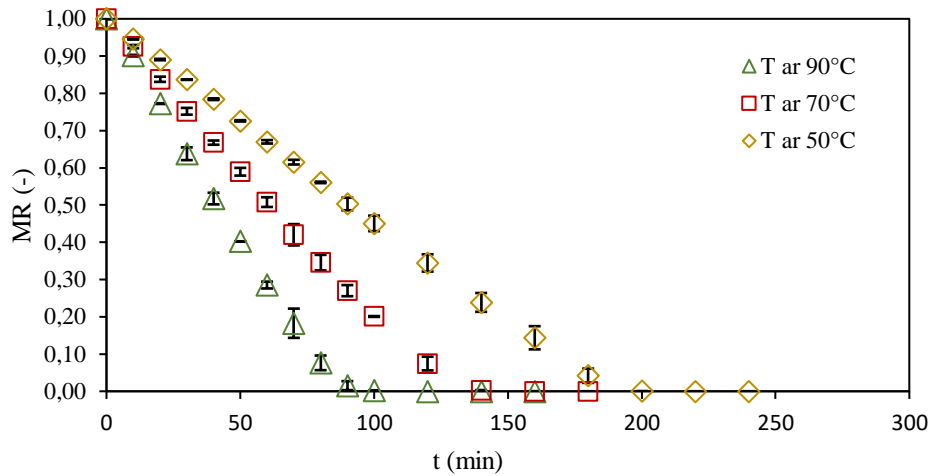
A formulação da espuma e as condições operacionais utilizadas neste trabalho foram definidas em estudo anterior de nosso grupo de pesquisa (LOPES et al., 2022). Neste estudo, foi avaliado o efeito dos fatores concentração de albumina, tempo e velocidade de agitação nas propriedades da espuma produzida a partir do extrato aquoso de café. A função desejabilidade foi também determinada com o intuito de se obter espumas com altas viscosidade e estabilidade, e baixa massa específica, e foi encontrado um valor igual a 87,78%, que é uma desejabilidade considerada muito boa por Lazic (2006). Essa desejabilidade correspondeu a uma massa específica de $0,1983 \text{ g/cm}^3$, viscosidade de $1186,1 \text{ mPa.s}$ e estabilidade de 99,99%, ou seja, valores próximos aos encontrados no presente trabalho.

De acordo com Van Arsdel e Copley (1964), a densidade da espuma para secagem deve situar-se entre $0,1$ e $0,6 \text{ g/cm}^3$, o que foi constatado com o resultado obtido. Em relação à estabilidade, de acordo com Kudra e Ratti (2006), espumas que não coalescem por pelo menos 1h podem ser consideradas estáveis durante todo o processo de secagem, o que de fato aconteceu. Além disso, o valor de estabilidade obtido está dentro da faixa encontrada por Borges et al. (2022), em um estudo de secagem de espuma de talos de couve, que foi de $94,33 \pm 0,21\%$ (secagem a $90 \text{ }^\circ\text{C}$) a $97,96 \pm 0,00\%$ (secagem a $50 \text{ }^\circ\text{C}$).

4.2. Secagem

Os dados coletados durante os ensaios de secagem em camada de espuma foram utilizados para a construção das curvas do adimensional de umidade (MR) e taxa de secagem (DR) em função do tempo (t), conforme mostram as Figuras 9 e 10, respectivamente.

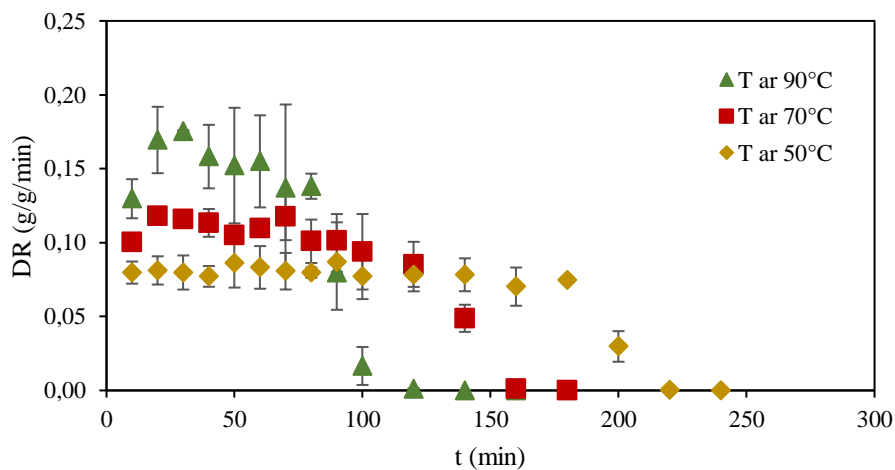
Figura 9 - Adimensional de umidade em função do tempo de secagem do extrato de café em camada de espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.



Fonte: Do autor (2023).

Observa-se na Figura 9 que o adimensional de umidade decresce até atingir o ponto de equilíbrio, o qual é alcançado de forma mais rápida quando se utiliza uma temperatura de ar de secagem mais elevada. Ao aumentar a temperatura do processo de 50 para 90 °C, nota-se uma redução de cerca de 55,0% no tempo gasto, o que pode ser explicado pela maior disparidade de temperatura entre o ar de secagem e a amostra, proporcionando uma maior força motriz para o processo de transferência de calor, e resultando em uma mais rápida remoção de água. Este comportamento era esperado e foi observado também por Silva et al. (2020) na secagem em leite de espuma para produção de café solúvel e Azizpour et al. (2014) durante a desidratação em camada de espuma de camarão.

Figura 10 – Curvas de taxa de secagem da espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.



Fonte: Do autor (2023).

Uma análise da Figura 10 mostra inicialmente que o período de taxa de secagem constante é predominante na secagem das espumas de café, indicando que o mecanismo que controla a secagem é o convectivo. Borges et al. (2022) e Azizpour et al. (2014) também encontraram uma predominância da taxa constante no processo *foam mat drying*, e justificam que a formação de espuma aumenta a área superficial disponível para a secagem. Dessa forma, a difusão de água interna ocorre de forma suficientemente rápida para repor a umidade superficial. A partir do instante em que não existe mais água livre na superfície, a taxa de secagem decresce, com a difusão passando a controlar o processo, conforme exposto pela Figura 10.

Tomando como base os períodos a taxa constante, é possível notar ainda que ao reduzir a temperatura do ar de secagem de 90 para 50 °C, há uma redução pela metade da taxa de secagem. Conforme explicado anteriormente, isto acontece pela menor força motriz para a transferência de calor, o que torna a desidratação mais lenta. À medida que a temperatura diminui, observa-se também que o período de secagem à taxa constante torna-se maior. Como a taxa de evaporação superficial torna-se mais lenta, a difusão interna consegue repor a umidade evaporada por um maior período de tempo, o que pode explicar tal comportamento.

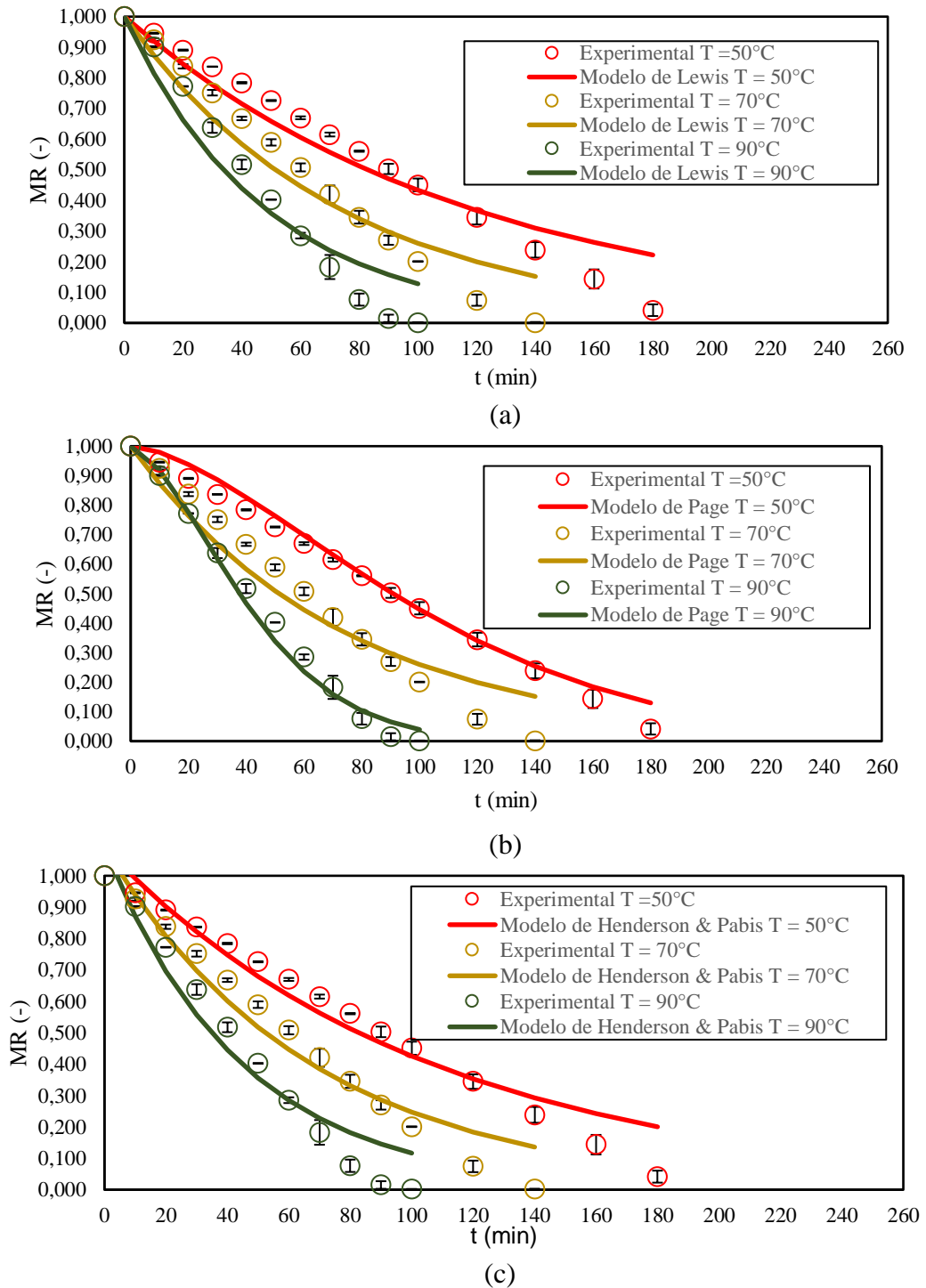
Aos dados experimentais de adimensional de umidade em função do tempo, foram ajustados os modelos de Lewis, Page, Henderson & Pabis, Midilli & Kucuk e Logarítmico (Figura 11 – a, b, c, d, e), e os resultados obtidos para os parâmetros (a, b, c, n), constante inicial de secagem (k_0), energia de ativação (E_a), coeficiente de determinação ajustado (R_{adj}^2) e soma dos quadrados dos resíduos (SQR) são apresentados na Tabela 2.

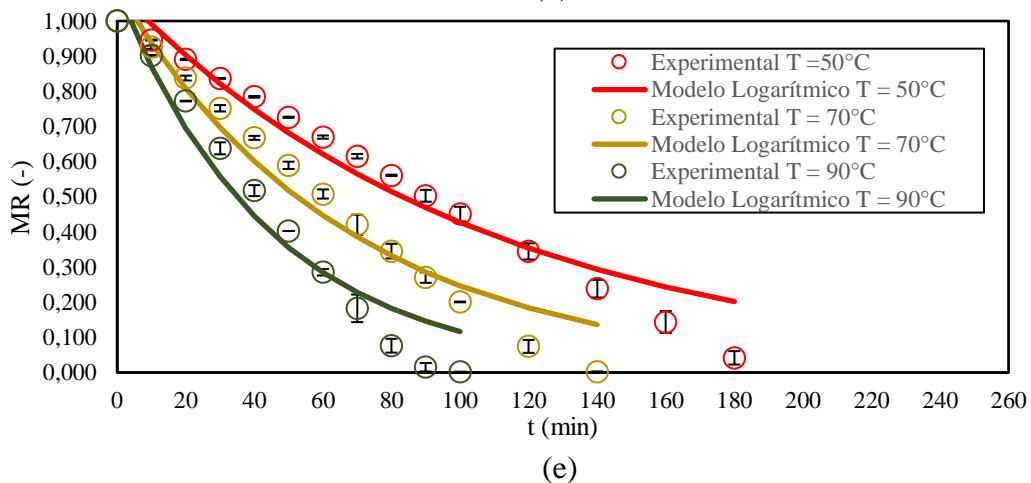
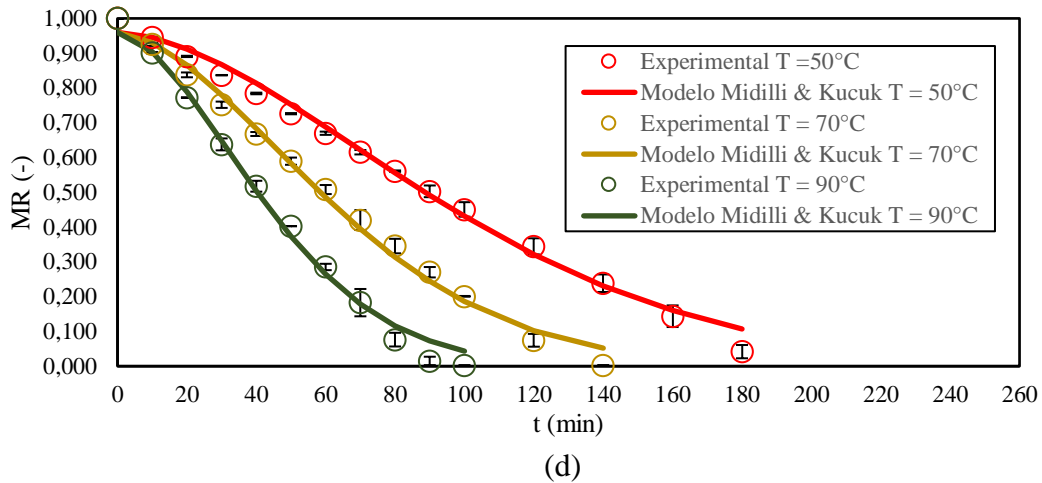
Tabela 2 – Parâmetros de ajuste, constante de secagem, energia de ativação, coeficiente de determinação ajustado e soma dos quadrados dos resíduos obtidos pelos modelos.

Modelo	a	b	c	n	k_0 (min^{-1})	E_a (KJ mol^{-1})	R_{adj}^2	SQR
Lewis	-	-	-	-	29,61	21,96	0,963	0,244
Page	-	-	-	1,58	166,98	33,86	0,988	0,048
Henderson & Pabis	1,09	-	-	-	24,23	21,10	0,953	0,192
Midilli & Kucuk	0,96	0,00	-	1,72	64,28	33,01	0,992	0,030
Logarítmico	1,09	-	0,00	-	25,35	21,24	0,952	0,192

Fonte: Do autor (2023).

Figura 11 – Dados experimentais de MR ajustados aos modelos (a) de Lewis, (b) de Page, (c) de Henderson & Pabis, (d) de Midilli & Kucuk e (e) Logarítmico.





Fonte: Do autor (2023).

Com os resultados apresentados na Tabela 2, afirma-se que o modelo de Midilli e Kucuk apresentou melhor ajuste aos dados experimentais devido ao menor SQR (0,030) e maior R_{adj}^2 (0,992) encontrados. Entretanto, o modelo de Page também se ajustou de forma satisfatória (SQR = 0,048 e $R_{adj}^2 = 0,988$). Uma análise qualitativa das Figuras 11 (a) à (e) corrobora a melhor qualidade de ajuste do modelo de Midilli & Kucuk. Maciel et al. (2021), em um estudo conduzido sobre a secagem em camada de espuma para produção de café instantâneo, também encontraram esse mesmo modelo como o que melhor representa o comportamento da desidratação.

Os valores de energia de ativação para a difusão de umidade, E_a , encontrados neste trabalho variaram entre 21,10 e 33,86 KJ/mol. Estes valores foram próximos ao obtido por Khodifad e Kumar (2019) na secagem de espuma de pinha ($E_a = 29,99$ KJ/mol) e Ayetigbo et al. (2021) na secagem de espuma de polpa de mandioca amarela ($E_a = 31,00$ a 37,7 KJ/mol), mas inferiores aos determinados por Borges et al. (2022) para a desidratação em camada de espuma de couve ($E_a = 35,16$ a 48,92 KJ/mol).

Diferentes valores de energia de ativação podem ser encontrados na secagem de alimentos devido às diferentes estruturas, características e composições internas (NETO; MEILI; FREIRE, 2022). A literatura mostra que para frutas e vegetais, os valores de E_a encontrados para a secagem em camada fina variam entre 12,7 e 110 kJ/mol. Contudo, os valores de E_a para materiais espumados normalmente se encontram na faixa de 15 a 40 KJ/mol (MISHRA et al. 2021; DEHGHANNYA et al., 2019), em acordo com os valores aqui obtidos.

Os ensaios de secagem realizados no presente trabalho mostraram ocorrer com taxa predominantemente constante (Figura 10), indicando que a migração de umidade do interior da espuma à superfície acontece de maneira mais fácil, conseguindo repor a evaporação de umidade superficial, portanto era esperado uma energia de ativação mais baixa.

4.3. Consumo específico de energia e emissões de CO₂

Os valores de SEC e emissões de CO₂ foram determinados no instante em que a umidade das amostras atingiu 43,737% (b.u.), e são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – SEC e emissão de CO₂ para o processo de secagem em leito de espuma do extrato aquoso de café nas temperaturas de 50, 70 e 90 °C.

T_{ar} (°C)	SEC (MJ Kg ⁻¹)	Emissão de CO ₂ (tCO ₂ MWh ⁻¹)
50	105,40 ± 14,37 ^a	5,33x10 ⁻⁵ ± 4,74x10 ^{-6a}
70	82,70 ± 2,03 ^a	4,48x10 ⁻⁵ ± 6,96x10 ^{-8a}
90	60,25 ± 0,88 ^b	3,56x10 ⁻⁵ ± 7,85x10 ^{-7b}

Nota: letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa pelo teste de médias ($p < 0,05$), enquanto letras iguais não diferem entre si significativamente.

Fonte: Do autor (2023).

Por meio da Tabela 3, observa-se que o aumento da temperatura do ar de secagem de 50 para 70 °C e de 50 para 90 °C resulta em uma redução do consumo específico de energia em 21,5% e 42,8%, respectivamente. Isso ocorre devido à maior taxa de secagem em temperaturas mais elevadas, conforme evidenciado na Figura 10. Como resultado, o tempo necessário para retirar a mesma quantidade de água da amostra é menor, o que tem um impacto direto no cálculo do consumo específico de energia. Adicionalmente, as emissões de CO₂ também diminuem em 15,9% e 33,2% ao aumentar a temperatura de 50 para 70 °C e para 90 °C, respectivamente, possivelmente também pela redução no tempo de processo.

Kumar et al. (2022) verificaram, na secagem de espuma de manga, uma diminuição no consumo específico de energia ao aumentar a temperatura de secagem, o que vai de acordo com os resultados obtidos e apresentados na Tabela 3. Além disso, no estudo realizado por Borges et al. (2022) sobre a secagem de espuma de talos de couve em camada fina usando temperaturas na faixa de 50 a 90 °C, encontrou-se valores de emissão de CO₂ variando de $1,18 \cdot 10^{-5}$ a $5,70 \cdot 10^{-5}$ t_{CO2}MWh⁻¹, e valores de SEC de 31,37 a 109,00 MJ.Kg⁻¹, estando os resultados obtidos de emissões de CO₂ ($3,56 \cdot 10^{-5}$ a $5,33 \cdot 10^{-5}$ t_{CO2}MWh⁻¹) e SEC ($60,25 \pm 0,88$ a $105,40 \pm 14,37$ MJ.Kg⁻¹) dentro dessas faixas.

4.4. Caracterização do pó

4.4.1. Umidade final, solubilidade e higroscopicidade

Na Tabela 4 são apresentadas as umidades finais (M_{b.u.}), solubilidade e higroscopicidade (HG) dos pós obtidos a partir da secagem em leito de espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.

Tabela 4 – Umidades finais em base seca e base úmida, solubilidade e higroscopicidade para o pó de café solúvel seco nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.

T _{ar} (°C)	M _{b.s.} (decimal)	M _{b.u.} (percentual)	Solubilidade (%)	HG (%)
50	0,09 ± 0,01 ^a	8,37 ± 0,85 ^a	58,08 ± 6,48 ^a	8,68 ± 0,87 ^a
70	0,05 ± 0,00 ^b	4,86 ± 0,23 ^b	43,58 ± 7,08 ^a	12,50 ± 0,21 ^b
90	0,03 ± 0,00 ^c	3,03 ± 0,10 ^c	27,65 ± 5,19 ^b	15,80 ± 2,10 ^b

Nota: letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa pelo teste de médias (p < 0,05), enquanto letras iguais não diferem entre si significativamente.

Fonte: Do autor (2023).

A Resolução da Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) n° 277 de 22 de setembro de 2005 estabelece um regulamento técnico para o café e produtos solúveis, no qual tem a comercialização proibida o café e solúveis que apresentarem alta umidade, sendo recomendado o percentual máximo de 5,0%.

Analisando as umidades finais apresentadas na Tabela 4, afirma-se que apenas os pós obtidos nas secagens a 70 e 90 °C estão dentro da faixa permitida pela ANVISA. Contudo, os valores encontrados (de 3,00 a 9,00% b.s.) são similares aos determinados por Karyadi et al. (2020) para pós de café solúvel ($3,53 \pm 0,19$ a $7,21 \pm 0,01\%$ b.s.) produzidos em *spray dryer*, utilizando temperaturas de 180, 200 e 220 °C. Ou seja, a secagem em espuma utilizando temperaturas de secagem bem mais baixas (50 a 90 °C) resultou em teores de umidade similares, o que confere uma vantagem à esta técnica em relação à de *spray drying*.

Nota-se que a espuma seca a uma menor temperatura (50 °C) apresenta maior umidade final ($M_{b.u.} = 8,37 \pm 0,85 \%$), indicando que a desidratação a essa temperatura teve menor perda de água. Gomes et al. (2017), ao realizarem secagem em camada de espuma de acerola nas temperaturas de 60 e 80 °C, verificaram também que há uma menor perda de água na menor temperatura utilizada.

De acordo com Costa et al. (2015), um produto com baixo teor de umidade resulta em um produto com maior higroscopicidade, o que foi demonstrado na Tabela 4. A higroscopicidade aumentou à medida que a temperatura de secagem também aumentou e, conseqüentemente, a umidade final diminuiu. Isso era previsível, uma vez que tal propriedade indica a capacidade do pó em absorver umidade do ar ambiente. Portanto, quanto maior a umidade do pó, menor será a quantidade de água que o produto conseguirá absorver. Em adição, os valores de higroscopicidade obtidos no presente trabalho ($8,68 \pm 0,87$ a $15,80 \pm 2,10 \%$) foram similares a outros valores obtidos na literatura, como os do trabalho de Jaya e Das (2004), que encontraram valores de HG entre 9,09 e 10,32 % para pós de café instantâneo.

Em relação à solubilidade é possível afirmar que os valores encontrados foram abaixo do esperado ($27,65 \pm 5,19$ a $58,08 \pm 6,48 \%$). Maciel (2017) realizou um estudo de secagem do extrato de café em leito de espuma, utilizando diferentes concentrações dos aditivos maltodextrina e proteínas do soro do leite e temperaturas de secagem de 40 a 80 °C. A solubilidade média dos pós ao final da secagem foi de 97,31%, valor muito superior à faixa encontrada neste trabalho. Sifat et al. (2021) ao realizarem a secagem de ameixa em leito de espuma, com a utilização de albumina como agente espumante, encontraram menores valores de solubilidade (33,6 a 50,1%) para o pó produzido utilizando temperatura de 65 °C. Souza et al. (2018) em um estudo sobre a secagem do extrato de tomate afirmam que a alta solubilidade dos pós obtidos ao final do processo está associada à alta solubilidade dos aditivos adicionados.

Os menores valores de solubilidade obtidos neste estudo estão provavelmente relacionados ao fato de a albumina ter se precipitado durante a dissolução dos pós de café solúvel em água, como pode ser visualizado pela fotografia apresentada na Figura 12. Segundo Cervi et al. (2022), a maioria das proteínas do ovo são desnaturadas quando expostas a temperaturas entre 60 e 100 °C por pelo menos uma hora e de acordo com Hardy e Jideani (2017), em pH 7, a temperatura de desnaturação da ovalbumina é de 84,5 °C. Todos os processos de secagem foram conduzidos por mais de uma hora e, assim, é provável que a albumina tenha sofrido desnaturação durante as secagens realizadas nas maiores temperaturas (70 a 90 °C). Ribeiro (2014) afirma que a desnaturação das proteínas é causada por qualquer

agente que desestabilize a estrutura inicial, incluindo a agitação, portanto é possível também que o batimento realizado na formação da espuma tenha contribuído para a desnaturação da albumina devido à intensidade da força de cisalhamento aplicada, o que explicaria a baixa solubilidade do pó produzido a 50 °C.

Figura 12 – Café instantâneo obtido na secagem a 90 °C solubilizado em água.



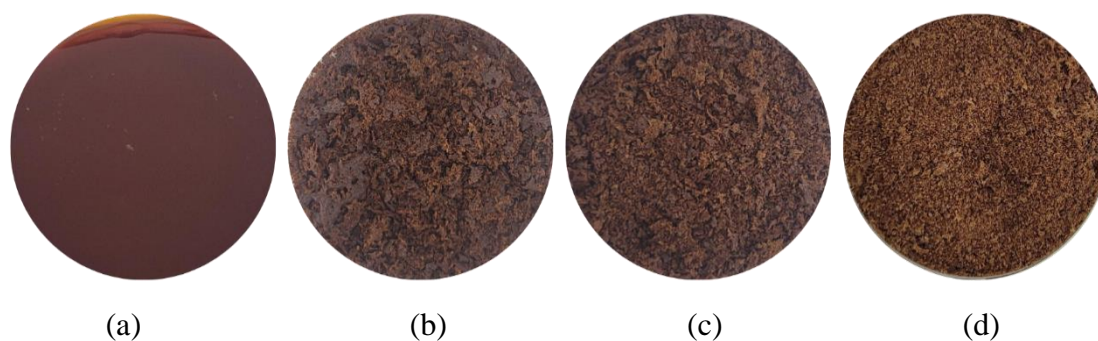
Fonte: Do autor (2023).

A baixa solubilidade, entretanto, não inviabiliza a utilização do pó produzido, possibilitando sua aplicação na criação de produtos alimentícios diversos que não precisam ser líquidos e não exigem completa solubilização. Ele pode ser incorporado na fabricação de outros itens, como biscoitos e balas, conferindo-lhes um característico sabor de café.

4.4.2. Análise de cor

As Figuras 13 (a, b, c, d) apresentam imagens do extrato aquoso concentrado de café e dos pós de café solúvel produzidos pelo processo de secagem a 50, 70 e 90 °C, respectivamente. Os parâmetros de cor de cada amostra foram determinados tanto pelo *software* Adobe Photoshop quanto por meio das Equações 11 a 16, e estão resumidos na Tabela 5.

Figura 13 – Imagens obtidas dos (a) extrato de café, (b) pó após secagem a 50°C (c) pó após secagem a 70°C, (d) pó após secagem a 90°C.



Fonte: Do autor (2023).

Tabela 5 – Parâmetros de cor dos pós obtidos pela secagem em leite de espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.

T_{ar} (°C)	L	a	b	L*	a*	b*	ΔE	BI
Extrato	78,61	149,59	139,72	30,83	20,79	11,50	-	92,14
50	80,30	142,92	137,95	31,49	14,51	9,84	130,04	69,43
70	77,51	143,88	138,99	30,40	15,42	10,81	129,02	78,99
90	83,15	147,40	149,59	32,61	18,73	20,79	118,96	135,70

Fonte: Do autor (2023).

Inicialmente, é possível observar que os valores do parâmetro L^* variaram de 30,40 a 32,61. Em um estudo realizado por Marcucci et al. (2013) com cafés solúveis comerciais brasileiros foi identificada uma luminosidade das amostras (L^*) variando entre 19,52 e 33,0 para cafés regulares e de 34,63 a 43,70 para cafés *gourmet*. Portanto, o solúvel obtido no presente estudo apresentou valores de L^* similares aos cafés regulares, apesar da utilização de pó de café 100% arábica para a extração. Possivelmente, essa diferença se deu pois, Marcucci et al. (2013), utilizaram o processo de liofilização como método de desidratação.

Ainda de acordo com Maciel (2017), valores positivos de a^* indicam uma tendência da amostra à cor vermelha, enquanto de b^* indicam uma tendência à cor amarela. Conforme Tabela 5, os valores de a^* e b^* são todos positivos e aumentam conforme o aumento da temperatura do ar de secagem, indicando uma predominância das cores amarela e vermelha nos pós de café obtidos. Ni'mah et al. (2021) também encontraram valores positivos desses parâmetros ao se realizar uma análise de cafés instantâneos.

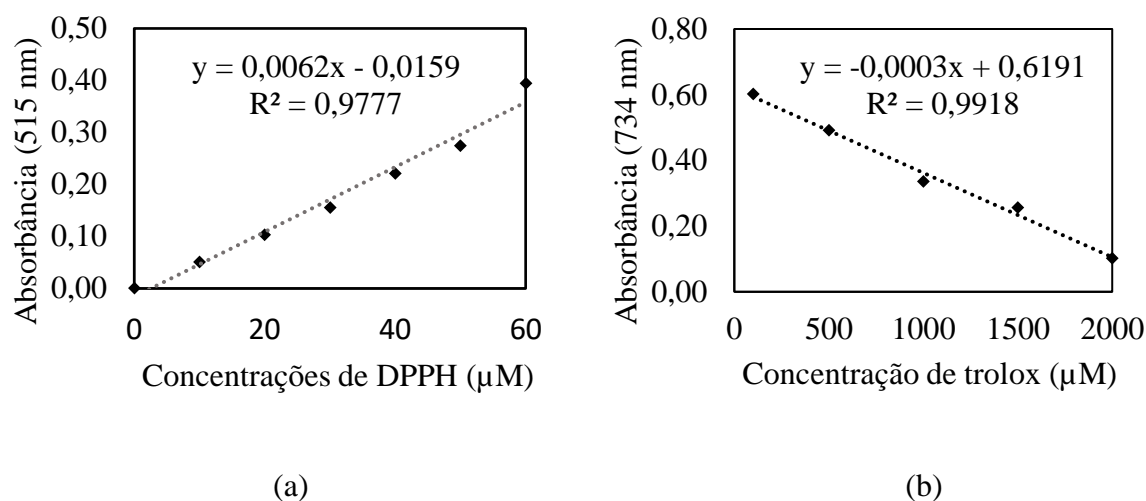
Por fim, à medida que a temperatura de secagem aumenta, observa-se uma redução no valor de diferença total de cor (ΔE), ao passo que o índice de escurecimento (BI) aumenta,

conforme Tabela 5. Isso indica que a amostra desidratada a 90 °C apresenta uma cor mais próxima ao extrato em comparação com aquelas secas a 50 e 70 °C. Uma possível explicação para isso é o menor tempo de secagem necessário com o uso da temperatura mais alta, resultando em uma degradação menor da cor inicial do produto. Já o índice de escurecimento foi mais pronunciado, mantendo a coloração marrom característica do extrato de café. Enquanto ΔE avalia uma variação total na coloração do produto, BI quantifica a coloração marrom da amostra, o que pode explicar a não linearidade entre as duas propriedades no presente estudo. Nunes et al. (2022) também identificaram um valor menor de ΔE ao utilizar a temperatura mais elevada de secagem para a espuma de talos de cenoura.

4.4.3. Atividade antioxidante

As curvas padrões de DPPH e Trolox obtidas são apresentadas nas Figuras 14 (a, b), enquanto as curvas obtidas a partir das diferentes diluições de café em DPPH e ABTS e as respectivas absorbâncias são apresentadas na Tabela 6.

Figura 14 – Curvas padrões de (a) DPPH e (b) Trolox.



Fonte: Do autor (2023).

Tabela 6 – Curvas das diferentes diluições do pó café (x) obtido a 50, 70 e 90 °C em DPPH e ABTS em função da absorbância (y).

Radical	Diluição pó 50°C	Diluição pó 70°C	Diluição pó 90°C
DPPH	$y = -0,00013x + 0,41667$ $R^2 = 0,999$	$y = -0,00012x + 0,48050$ $R^2 = 0,990$	$y = -0,00008x + 0,16033$ $R^2 = 0,862$
ABTS	$y = -0,0001x + 0,7845$ $R^2 = 0,988$	$y = -0,0001x + 0,7560$ $R^2 = 0,971$	$y = -0,0001x + 0,6714$ $R^2 = 0,970$

Fonte: Do autor (2023).

A partir dessas curvas, foram determinados os valores de atividade antioxidante para os pós obtidos nas temperaturas de secagem de 50, 70 e 90 °C, conforme descrito no item 3.3.5, sendo esses apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Atividade Antioxidante (AA) dos pós de café solúvel obtidos a 50, 70 e 90 °C pelos métodos de captura dos radicais DPPH e ABTS.

Método	AA 50°C	AA 70°C	AA 90°C
DPPH (g extrato café/ g DPPH)	313,61	409,21	91,14
ABTS (μ M Trolox/ g extrato café)	214,87	228,86	283,85

Fonte: Do autor (2023).

A atividade antioxidante (AA) determinada pelo método de captura do radical ABTS define a habilidade em que o antioxidante do café possui em sequestrar o radical (MACIEL et al., 2017), portanto, afirma-se que 214,87 a 283,85 μ M do radical são sequestrados por apenas 1 g do extrato de café solúvel. Ao realizar uma conversão de μ M de Trolox para g, são obtidos resultados de AA de 5,38; 5,73; 7,10 g Trolox/ 100 g extrato de café para pós obtidos a 50, 70 e 90 °C, respectivamente. Em contraste, Marcucci et al. (2017) ao analisar a atividade antioxidante de cafés solúveis comerciais utilizando o método ABTS, obtiveram valores de 25,2 a 34,9 g Trolox/100 g de extrato. Por sua vez, Hutachok et al. (2021) encontraram um valor de 16 g Trolox/100 g de extrato para uma amostra de café solúvel analisada. Todos esses valores são superiores aos encontrados no presente estudo.

O método de captura de DPPH avalia a atividade sequestradora do extrato de café em relação ao radical, encontrando o resultado que é necessário para reduzir em 50% a concentração inicial de DPPH (MACIEL, 2017; RUFINO et al., 2007a). Portanto, pela Tabela 7, 91,14 a 409,21 g de extrato de café/ g de DPPH são necessários para reduzir em 50% a concentração de 0,06 mM de DPPH. Os estudos encontrados de análise AA pelo método de DPPH para cafés solúveis possuem resultados expressos em percentual de sequestro desse radical, e não em concentração, portanto não foi possível realizar uma comparação entre os valores.

Maciel (2017) concluiu que a secagem de extrato de café em leito de espuma proporciona resultados satisfatórios de AA para os pós instantâneos obtidos e, que aumentando a concentração de aditivos são obtidos valores mais baixos de AA. É possível que, no presente estudo, a adição de albumina tenha exercido influência nos resultados de AA, considerando que o extrato obtido com o pó não consistia apenas de café, mas também de aditivos.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa se dedicou à análise do processo de secagem em leito de espuma e suas consequências nas propriedades do pó resultante. A formulação da espuma com 5,05% m/V de albumina e 0,10% m/V de goma xantana, utilizando tempo e velocidade de batimento de 6,5 min e 1066,67 rpm, respectivamente, resultou em valores de massa específica (ρ), viscosidade (η), e estabilidade (E) de $0,25 \pm 0,08$ g/cm³, $1381 \pm 49,50$ mPa.s, e $96,85 \pm 0,18\%$, respectivamente. Esses parâmetros de caracterização da espuma estão alinhados com um estudo anterior do nosso grupo de pesquisa, onde a desejabilidade foi de 87,78%, indicando a obtenção de uma espuma com propriedades desejáveis. Esses resultados estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura para densidade e estabilidade de espumas destinadas à secagem.

Na etapa de secagem em leito de espuma, observou-se uma relação direta entre a temperatura do ar de secagem e a taxa de secagem, onde o aumento de 50 para 90 °C resultou em um aumento de 100% na taxa e uma redução de aproximadamente 55% no tempo de secagem. A predominância da taxa de secagem constante indicou um controle convectivo do processo, influenciado pela formação de espuma que aumenta a área superficial disponível para a desidratação. O modelo de Midilli e Kucuk se destacou como o de melhor ajuste aos dados experimentais e as energias de ativação obtidas (21,10 a 33,86 KJ/mol) estão dentro da faixa encontrada na literatura para materiais espumados.

A análise do consumo específico de energia (SEC) e emissões de CO₂ revelou uma redução significativa desses parâmetros ao aumentar a temperatura do ar de secagem, o que era esperado pela maior taxa de secagem em temperaturas mais elevadas. A variação de 50 para 90 °C resultou em uma diminuição de 42,8% no consumo específico de energia e 33,2% nas emissões de CO₂. Além disso, os valores de emissões de CO₂ encontrados ($3,56 \cdot 10^{-5}$ a $5,33 \cdot 10^{-5}$ tCO₂MWh⁻¹) estão dentro da faixa obtida na literatura para secagem em camada fina utilizando temperaturas similares.

A umidade final dos pós se manteve dentro dos limites estabelecidos pela ANVISA apenas para as secagens realizadas a 70 e 90 °C (3,00 e 5,00% b.s.). A higroscopicidade aumentou com a temperatura de secagem, já que nas maiores temperaturas, os resultados de umidade final foram menores. Adicionalmente, os valores determinados (HG = $8,68 \pm 0,87$ a $15,80 \pm 2,10$ %) são similares aos encontrados na literatura para pós de café instantâneo. A solubilidade, no entanto, ficou abaixo do esperado ($27,65 \pm 5,19$ a $58,08 \pm 6,48$ %), sugerindo que a desnaturação da albumina pode ter influenciado negativamente nesse atributo. Apesar

disso, a baixa solubilidade não inviabiliza a utilização dos pós produzidos, possibilitando a incorporação destes em produtos alimentícios, conferindo-lhes um sabor característico de café.

A análise de cor revelou que, à medida que a temperatura de secagem aumenta, há uma redução na diferença total de cor (ΔE) e um aumento no índice de escurecimento (BI), indicando uma cor marrom mais pura. Além disso, os parâmetros a^* e b^* apresentaram valores positivos, que indicam uma tendência das amostras às cores vermelha e amarela. O parâmetro L^* , entretanto, não apresentou valores próximos aos encontrados na literatura para cafés *gourmet*. A atividade antioxidante (AA), avaliada pelo método ABTS, apresentou resultados inferiores aos encontrados na literatura para cafés solúveis, indicando uma possível influência dos aditivos utilizados na formulação da espuma. Além disso, com o aumento da temperatura tem-se uma maior AA, indicando menor degradação do produto. A AA obtida pelo método DPPH não foi possível de ser comparada, já que os estudos da literatura não possuem resultados expressos da mesma forma que no presente estudo.

Em conclusão, o estudo proporcionou uma compreensão abrangente da secagem em leito de espuma e os resultados obtidos fornecem boas informações para o uso do processo na produção de extrato de café em pó. De maneira geral, a utilização da temperatura de secagem mais elevada (90°) conduziu a resultados superiores, com exceção quando se abordou as propriedades de higroscopicidade e solubilidade. Sugere-se para futuros trabalhos o uso de novos aditivos como agentes emulsificantes da espuma para determinar se a albumina realmente ocasionou os valores baixos de atividade antioxidante e solubilidade. Adicionalmente, foi possível observar que a desidratação em camada de espuma mostra-se promissora para a produção de café solúvel.

REFERÊNCIAS

A Expansão do café no Brasil - **ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café**. Disponível em: <<https://www.abic.com.br/tudo-de-cafe/a-expansao-do-cafe-no-brasil/>>. Acesso em: 20 set. 2023.

ANDRADE, E. T. de; CORRÊA, P. C.; TEIXEIRA, L. P.; PEREIRA, R. G.; CALOMENI, J. de F. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engevista**, v.8, p.83-95, 2006.

ANDRADE, Paulo Sérgio de. **Estudo da secagem de café arábica (Coffea arabica L.) despulpado em secador roto-aerado**. 2023. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.87>.

AOAC (Ed.). (1990). **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists** (15th ed.). AOAC

ARAÚJO, C. da S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. do N.; TEIXEIRA, L. J. Q. (2017), “Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos”, **Brazilian Journal of Food Technology**, Vol 20.

ARAÚJO, K. T. A. et al. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo das polpas de noni e umbu. **Research, Society and Development**, 18 abr. 2021.

ARZHAVITINA, A; STECKEL, Hartwig. Foams for pharmaceutical and cosmetic application. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 394, n. 1-2, p. 1–17, 1 jul. 2010.

AYETIGBO, Oluwatoyin; LATIF, Sajid; ABASS, Adebayo; MÜLLER, Joachim. Drying Kinetics and Effect of Drying Conditions on Selected Physicochemical Properties of Foam from Yellow-fleshed and White-fleshed Cassava (Manihot Esculenta) Varieties. **Food and Bioproducts Processing** 127 (2021): 454-64. Web.

AZIZPOUR, M. et al (2014). Optimization of Foaming Parameters and Investigating the Effects of Drying Temperature on the Foam-Mat Drying of Shrimp (Penaeus indicus), **Drying Technology**, 32:4, 374-384, DOI: 10.1080/07373937.2013.794829

BARMORE, Mark Alfred. **Influência de fatores químicos e físicos em espumas de clara de ovo**. Bul técnica (Estação Experimental Agrícola do Colorado); 9 de 1934.

BELAL, Md et al. Effect Of Foaming Agent Concentration And Foam Stabilizer On The Foaming Capacity And Physical Properties Of Tomato Powder At Dried At Different Temperature. **Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences** (2022): E4741. Web.

Bom momento e avanço no mercado internacional definem segmento de cafés especiais no estado. **AGÊNCIA MINAS.** Disponível em: <<https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/bom-momento-e-avanco-no-mercado-internacional-definem-segmento-de-cafes-especiais-no-estado>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

BORGES, H. M. A.; BORÉL, L. D. M.; LIMA-CORRÊA, R. A. B. (2022). Effects of temperature and foam layer thickness on collard greens powder production by foam mat drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, 00, e16755.

BRAZIL. Average factor - Corporate inventories. Brasília: [s.n.]. Disponível em: < page — Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (www.gov.br)>.

CAKMAK, Hulya; OZYURT, Vasfiye H.. Effect of Foam-mat Drying on Bioactive, Powder and Thermal Properties of Carrot Juice Powders. **Anais Da Academia Brasileira De Ciências** 95.3 (2023): E20220554. Web.

CAPARINO, O. A. et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine “Carabao” var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 111, p. 135–148, 2012.

CARDOSO, Carlos Eduardo de Faria et al. Improvement of the Phenolic Composition and the Antioxidant Capacity of Red Guava (*Psidium Guajava*) and Watermelon (*Citrullus Lanatus*) Powders by Means of Foam Blanket Drying. **Food Chemistry Advances** 3 (2023): 100368. Web.

CERVI, Renato Clini et al. Caracterização reológica de ovos rhea (*Rhea americana*) submetidos a diferentes períodos de armazenamento. **Ciência Animal Brasileira**, v. 23, 2022.

COLAÇO, R. et al. Açai Pulp Dehydration by Foam-mat Drying to Produces Açai Powder. *Scientia Plena* 18.9 (2022): **Scientia Plena**, 2022, Vol.18 (9). Web.

COSTA, S. S. et al. Drying by spray drying in the food industry: Micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. **African journal of food science**, v. 9, n. 9, p. 462–470, 2015.

CRUZ, W. F. **Obtenção de polpa de GOIABA (*Psidium guajava* L.) em pó pelo método de secagem em camada de espuma**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

DEHGHANNYA, J., POURAHMAD, M., GHANBARZADEH, B., & GHAFFARI, H. (2019). Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. **International Journal of Thermal Sciences**, 135, 30e43. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023>

EASTMAN, J.; MOORE, C. Cold-water-soluble granular starch for gelled food compositions. **US Patent** 4,465,702, 1984.

ELPÍDIO, Cinthia Meirelly de Araújo. **Secagem de ameixa pelo método de camada de espuma: otimização dos parâmetros e caracterização do produto**. 2020. 172f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>>. Acesso em: 02 nov. 2023.

Estudo de Caso - Indústria de Café Solúvel. [s.l.] PUCRIO, [s.d.]. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15503/15503_5.PDF>. Acesso em: 21 nov. 2023.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. [s.l.] **Artmed Editora**, 2018.

FIGUEREDO, Rita C. R.; RIBEIRO, Fabiana A. L.; SABADINI, Edvaldo. Ciência de espumas - aplicação na extinção de incêndios. **Química Nova**, v. 22, n. 1, p. 126–130, fev. 1999. Acesso em: 21 nov. 2022.

FRANCISCO, J. S.; SANTOS, A. C. F.; BENSASSIL, M. de T. Efeito das informações e características da embalagem na expectativa e aceitação de café solúvel adicionado de café torrado micronizado. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 17, n. 3, p. 243–251, 1 set. 2014.

FRANCO, T. S. Desidratação osmótica de yacon pelo método de camada de espuma. Curitiba, 192p. **Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

GALVANI, Henrique. **Café solúvel: saiba o que é, como é feito e suas características**. 2021. Disponível em: <<https://blog.veroo.com.br/cafe-soluvel/>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

GEANKOPLIS, C. J.; **Processo de transporte e operações unitárias**. 3 ed. p. 579- 634, 2003.

GOMES et al. **Cinética De Secagem Em Camada De Espuma E Caracterização Física De Acerola Em Pó**. 2017. Disponível em:

HARDY Z. & V. A. JIDEANI (2017) Foam-mat drying technology: A review, **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 57:12, 2560-2572, DOI: 10.1080/10408398.2015.1020359

HUTACHOK, Nuntouchaporn *et al.* Chemical Analysis, Toxicity Study, and Free-Radical Scavenging and Iron-Binding Assays Involving Coffee (*Coffea arabica*) Extracts. **Molecules**, v. 26, n. 14, p. 4169–4169, 8 jul. 2021.

ILLY, A.; VIANNI, R. Espresso coffee: the chemistry of quality. **San Diego: Academic**, 1996. p. 253

JAKUBCZYK, A. et al. The CC genotype in HTR2A T102C polymorphism is associated with behavioral impulsivity in alcohol-dependent patients. **Journal of psychiatric research**, v. 46, n. 1, p. 44–49, 2011.

INCROPERA, F. P. (wcs)**Introduction to Heat Transfer 5th Edition Binder Ready W/ Wileyplus Set**. 5. ed. [s.l.] Wiley, 2008.

KANDASAMY, Palani et al. Optimization of process parameters for foam-mat drying of papaya pulp. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 10, p. 2526–2534, 23 ago. 2012.

KARYADI, J. N. W. et al. Effect of drying temperature of small scale spray dryer on physical properties of coffee powder. **Pertanika journal of science & technology**, v. 28, n. 4, 2020.

KHODIFAD, B C; KUMAR, Navneet. Foaming properties of custard apple pulp and mathematical modelling of foam mat drying. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 2, p. 526–536, 10 set. 2019.

KIM, Byung-Ho et al. A facile single-step synthesis of polyvinylpyrrolidone–silver nanocomposites using a conventional spray dryer. **Nanotechnology**, 18 dez. 2017.

LAZIC, Z. R. Design of experiments in chemical engineering: a practical guide. [s.l.] **John Wiley & Sons**, 2006

LOPES, M. A. et al. **Produção De Café Solúvel: Formação De Espuma Do Extrato De Café E Secagem Em Camada De Espuma**. Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. **Anais**.Uberlândia - MG, BR: Galoa, 2022.

MACIEL, K. S. et al. (2022) Optimization of foam mat drying for instant coffee processing and its effect on drying kinetics and quality characteristics, **Drying Technology**, 40:9, 1866-1880, DOI: 10.1080/07373937.2021.1887210

MACIEL, R. M. G. et al. Mathematical modeling of the foam-mat drying curves of guava pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 10, p. 721–725, 1 out. 2017.

MARCUCCI, C.T.; ALMEIDA, M.B.; NIXDORF, S.L.; BENASSI, M.T. Teores de trigonelina, ácido 5-cafeoilquínico, cafeína e melanoidinas em cafés solúveis comerciais brasileiros. **Quim. Nova** 2013, 36, 544–548, 2013.

MARCUCCI, Carolina Tolentino et al. Antioxidant Activity of Commercial Soluble Coffees. **Beverages**, v. 3, n. 4, p. 27–27, 21 jun. 2017.

MARQUES, L. G. Liofilização de frutas tropicais. 2008. 255p. **Tese (Doutorado em Engenharia Química)** - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2008.

MATOS, Joana D’arc P. de et al. Foam mat drying kinetics of jambolan and acerola mixed pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 7, p. 502–512, jul. 2022. Acesso em: 5 maio 2023.

MCCABE, W. L. Unit operations of chemical engineering. 7th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2005. 1140p. (**McGraw-Hill chemical engineering series**). ISBN 10: 0072848235.

MIDILLI, Adnan; KUCUK, Haydar. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Pistachio by Using Solar Energy. **Energy Conversion and Management** 44.7 (2003): 1111-122. Web.

Ministério da Saúde. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0277_22_09_2005.html>. Acesso em: 21 nov. 2023.

MISHRA, M., KANDASAMY, P., SHUKLA, R. N., & KUMAR, A. (2021). Convective hot-air drying of green mango: Influence of hot water blanching and chemical pretreatments on drying kinetics and physicochemical properties of dried product. **International Journal of Fruit Science**, 21(1), 732e757. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1930626>

MONTEIRO, Marlene et al. Influência da torra sobre a aceitação da bebida café. **Revista Ceres**, v. 57, n. 2, p. 145–150, 1 abr. 2010.

NETO, L. D. D. A. S.; MEILI, L.; FREIRE, J. T. **Cinética De Secagem E Energia De Ativação Do Hidróxido Duplolamelar Mg₂-Co₃**. Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Anais.Uberlândia - MG, BR: Galoa, 2022.

NI'MAH, M. W.; HASBULLAH, U. H. A.; RETNOWATI, E. I. Production of Robusta instant coffee powder with variation of fillers. **Agrointek: jurnal teknologi industri pertanian**, v. 15, n. 3, p. 932–942, 2021.

NUNES, G., NASCIMENTO, B. S. & LIMA-CORRÊA, R. A. (2022). Development of carrot top powders using foam mat drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, 00, e16487. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16487>

O café brasileiro na atualidade - ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café. Disponível em: <<https://www.abic.com.br/tudo-de-cafe/o-cafe-brasileiro-na-atualidade/>>. Acesso em: 12 out. 2023.

O que é o café solúvel? - ABICS. Disponível em: <<https://www.abics.com.br/o-que-e-o-cafe-soluvel/>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

OLIVEIRA, O. W.; PETROVICK, P. R. Secagem por aspersão (spray drying) de extratos vegetais: bases e aplicações. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 20, n. 4, p. 641–650, 1 set. 2010.

OLIVEIRA, W. E. S. **Determinação dos parâmetros para a secagem em camada de espuma (foam-mat drying) das folhas da arruda (Ruta graveolens L.)**. [s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2019.

OSSANI, Paulo Cesar et al. Análise De Múltiplos Fatores Em Dados Qualitativos Ordinais: Estudo De Caso Do Comportamento Dos Consumidores Em Relação À Qualidade De Cafés. **Revista da Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto**, v. 8, p. 14-14, 2021.

PERUZZOLO, Marina Carvalho; CRUZ, Bruna Costa Ferreira Da; RONQUI, Ludimilla. Polinização e produtividade do café no Brasil. **Pubvet**, v. 14, n. 4, p. 1–6, abr. 2019.

Planejamento e gerenciamento da cafeicultura. **EPAMIG**, p. 128, 2008. Disponível em: <http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/informe_agropecuaria/Planejamento_e_gerenciamento_da_cafeicultura.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

PRIYADARSHINI, S. et al. Biochemical, and Sensory Qualities of Jackfruit Pulp Powder Produced through Optimized Foam-mat Drying Parameters. **Journal of Food Science** 88.3 (2023): 926-41. Web.

Relatório do Café Solúvel do Brasil. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://agenciap1.files.wordpress.com/2023/01/relatorio-do-cafe-soluvel-do-brasil-2022.pdf?force_download=true>. Acesso em: 18 jul. 2023.

RIBEIRO, António J. Proteína. **Revista de ciência elementar**, v. 2, n. 3, 30 out. 2014.

RICHARDSON, J.F.; HARKER, J.H.; BACKHURST, J.R. Coulson and Richardson's Chemical Engineering – **Particle Technology and Separation Processes**, 5a ed., vol. 2, 2002.

ROHILLA, SHUBHAM; MAHANTA, CHARU LATA. Foam mat dried tamarillo powder: Effect of foaming agents on drying kinetics, physicochemical and phytochemical properties. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 12, 28 out. 2022.

RUFINO, Maria do Socorro Moura et al. Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pela Captura do Radical Livre DPPH: Comunicado Técnico 127. **EMBRAPA**, Fortaleza, CE, Julho 2007a. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/426953/metodologia-cientifica>>

determinacao-da-atividade-antioxidante-total-em-frutas-pela-captura-do-radical-livre-dpph.>

Acesso em: 21 nov. 2023.

RUFINO, Maria do Socorro Moura et al. Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pela Captura do Radical Livre ABTS: Comunicado Técnico 128. **EMBRAPA**, Fortaleza, CE, Julho 2007b. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/426954/metodologia-cientifica-determinacao-da-atividade-antioxidante-total-em-frutas-pela-captura-do-radical-livre-abts>>

Acesso em: 21 nov. 2023.

SHAMEENA BEEGUM, P. P. et al. Foam Mat Drying Technique in Coconut Milk: Effect of Additives on Foaming and Powder Properties and Its Economic Analysis. **Journal of Food Processing and Preservation** 46.11 (2022): N/a. Web.

SHOFINITA, D. et al. Drying methods of coffee extracts and their effects on physicochemical properties: A review. **Food and bioprocess technology**, 2023.

SIFAT, Saad A. D. et al. Response Surface Approach to Optimize the Conditions of Foam Mat Drying of Plum in relation to the Physical-Chemical and Antioxidant Properties of Plum Powder. **International Journal of Food Science**, v. 2021, p. e3681807, 20 dez. 2021.

SILVA, Eugenia Telis De Vilela et al. **Secagem por liofilização: método de operação e relevância na área de alimentos**. Anais I CONAPESC. Campina Grande: Realize Editora, 2016.

SILVA, G. H. S., BRESSANI, A. P. P., & JUNQUEIRA, M. S. (2020). Page optimization of the foam-mat drying process to soluble coffee production. **Brazilian Journal of Food Technology**, 23, e2019145. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.14519>

SOUSA, F. C. de; SOUSA, E. P. de; SILVA, L. M. de M.; MARTINS, J. J. A.; GOMES, J. P.; ROCHA, A. P. T. da. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti. **Revista Educação Agrícola Superior**, v.26, p.108-112, 2011.

SOUZA, C. R. F. DE; MAQUES, P. S.; OLIVEIRA, W. P. DE. Formação e caracterização de nanopartículas lipídicas sólidas redispersíveis contendo compostos bioativos de *Petiveria alliacea* L. **XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. Anais. São Paulo: Blucher, 2015

Sustentabilidade - **ABIA - Associação Brasileira da Indústria de Alimentos**. Disponível em: <<https://www.abia.org.br/sustentabilidade>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

TERRONI, H. C. et al. LIOFILIZAÇÃO. **Revista Científica UNILAGO**, [s.d.].

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. Drying characteristics and quality of banana foam mat. **Journal of Food Engineering, Amsterdam**, v. 86, n. 4, p. 573-583, 2008.

THUY, Nguyen Minh et al. Optimization of Mulberry Extract Foam-Mat Drying Process Parameters. **Molecules (Basel, Switzerland)** 27.23 (2022): 8570. Web.

VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, C. M. J., Food dehydration. Westport, Connecticut: **The Avi Publishing Company**, 1964. v. 2, 721p

Vendas de café solúvel no mundo devem atingir US\$ 42,5 bilhões em 2025. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/22416363/vendas-de-cafe-soluvel-no-mundo-devem-atingir-us-425-bilhoes-em-2025>>. Acesso em: 21 jul. 2023.

VIMERCATI, W. C. et al. Encapsulation of coffee silverskin extracts by foam mat drying and comparison with powders obtained by spray drying and freeze-drying. **Journal of food science**, v. 87, n. 4, p. 1767–1779, 2022.

WANDERLEY, A. B. et al. Functional Benefits of Green Coffee in Metabolic Syndrome Prevention: A Review Study. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, v. 9, n.7, p. 5-12, 2017.

WILDE, P.; CLARK, D. (1996), Foam and stability. Method of testing protein functionality. G.M. Hall. **Blackie Academic and professional**, 111-152.